

Rajamuovattavuustutkimus kuumavalssatulle teräkselle Optim
650 MC

Superterästen Rakenteiden Optimointi 2

Raimo Vierelä

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö

Konetekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2012

ALKUSANAT

Haluan esittää kiitokseni kaikille henkilöille, jotka enemmän tai vähemmän ovat vaikuttaneet tämän opinnäytetyön valmistumiseen. Iso kiitos työn toimeksiantajalle Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Tekniikan TKI-osastolle ja varsinkin TkL Timo Kaupille joka mahdollisti sen, että pystyin työskentelemään kaikki mahdolliset tunnit työn parissa samalla työskennellen koululle. Kiitokset kuuluvat myös erikoisasantuntija DI Kimmo Keltamäelle työn valvonnasta ja opastamisesta, samoin kiitokset DI Vili Kestille avusta ja yhteistyöstä Rautaruukin kanssa ja tietenkin materiaalien toimittamisesta. Kiitokset myös DI Mari-Selina Kantaselle työn hyvästä ohjauksesta ja projekti-insinööri Marko Ylitölvalle GOM Aramis-operaattorina ja kaikesta muusta avusta testauslaitteiston käytön opetuksessa. Kiitos myös muulle TKI-osaston väelle hyvästä työilmapiiristä, joka piristi niinä päivinä kun tuntui, ettei työstä tule yhtään mitään.

Lopuksi kiitokset perheelleni ja sukulaisille jotka uskollisesti jaksoivat kysyä että koska valmistun, vaikka itsellä joskus usko tuntuikin loppuvan.

Kemissä 2012

Raimo Vierelä

TIIVISTELMÄ

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

Tekijä(t):	Raimo Vierelä
Opinnäytetyön nimi:	Rajamuovattavuustutkimus kuumavalssatulle teräkselle Optim 650 MC
Sivuja (+liitteitä):	47+3
<p>Opinnäytetyön aiheena oli suorittaa rajamuovattavuustutkimus Rautaruukin kuumavalssatulle teräkselle Optim 650 MC (3 mm). Tutkimuksessa suoritettiin Nakajima-testi, Erichsenin kupinvenytyskoe sekä reiänlaajennustesti Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Tuloksia verrattiin Optim 700 MC Plus -teräksen (3 mm) tuloksiin.</p> <p>Rajamuovattavuustutkimuksen lisäksi työssä tehtiin kirjallisuusselvitys teräksen muokkaamisesta ja muovausominaisuuksista. Työssä selvitettiin tärkeimpiä testausmenetelmiä muovaustutkimuksessa sekä muovaustutkimuksen hyötyjä. Työssä tehtiin myös selvitys hyviä muovausominaisuuksia vaativista käyttökohteista sekä mahdollisista uusista sovellusmahdollisuuksista.</p> <p>Työ aloitettiin teorian opiskelulla sekä kirjallisuusselvityksillä. Aiheen vähäinen tuntemus aiheutti alussa ongelmia. Hyvät työohjeet sekä selkeät standardit muovattavuuskokeille helpottivat kokeellisen osan suorittamista. Kaikki testit suoritettiin Erichsenin 145–60 muovattavuustutkimuslaitteistolla ja Nakajima-testissä käytettiin lisäksi GOM:n optista venymämittauslaitteistoa sekä ARAMIS-sovellusta rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseen.</p> <p>Testit onnistuivat kauttaaltaan hyvin, ainoastaan reiänlaajennustestissä jouduttiin poikkeamaan hiukan standardista osan rikkoutumisen vuoksi, mutta testi ehdittiin uusimaan vielä standardin mukaisesti. Myös Nakajima-testissä oli yhden näytesarjan kanssa pieniä ongelmia näytteiden tunnistamisen suhteen. Tuloksien perusteella Optim 650 MC:n muovausominaisuudet ovat lähes samaa luokkaa kuin Optim 700 MC Plussallakin tai jopa vähän paremmat. Koska reiänlaajennussuhde on näinkin paljon parempi, voidaan todeta, että Optim 650 MC:lle löytyisi muitakin käyttökohteita, kuin ne missä sitä nykyään käytetään. Toisaalta myös Optim 700 MC Plussaa voidaan tarjota vaihtoehtoisesti Optim 650 MC:n tilalle, koska muovattavuusominaisuudet ovat näinkin lähellä toisiaan ja lujuutta on vielä hiukan enemmän. Muovattavuustesteistä on näin ollen merkittävää hyötyä, jotta osataan tarjota asiakkaille oikeanlaisia materiaalia tarpeen mukaan.</p>	
Asiasanat: kuumavalssaus, teräs, muovaus, muokattavuus, rajamuovattavuus	

ABSTRACT

KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Name:	Raimo Vierelä
Title:	Edge formability research for hot-rolled steel Optim 650 MC
Pages (+appendices):	47+3
<p>The subject of this thesis was to perform edge formability research for Rautaruukki's hot-rolled steel Optim 650 MC (3 mm). The following tests were carried out in the research Nakajima test, Erichsen cupping test and hole expanding test. The tests were carried out in the Material Testing Laboratory of Kemi-Tornio University of Applied sciences. The test results were compared to Rautaruukki's hot-rolled steel Optim 700 MC Plus (3 mm) results.</p> <p>In addition to the edge formability research a literature survey was made of steel forming and steel forming properties. The most important testing procedures in the formability study and the benefits of the formability study were also clarified in the theory part. In addition in the thesis it was also found out where these steels possessing good forming properties are used and their possible new applications.</p> <p>The work was started by studying theory and literature surveys. In the beginning the low knowledge of the subject caused problems. Good working instructions and the clear standards of formability tests simplified the making of experimental part. All tests were carried out with the Erichsen 145-60 sheet metal testing machine and with the Nakajima test were also used the GOM optical stretch measurement system and ARAMIS software to define forming limit curve (FLC).</p> <p>Tests succeeded throughout, only in the hole expanding test one had to deviate slightly from the standard because a part broke on the testing machine, but luckily there was time to renew the test according to the standard. The Nakajima test also showed small problems in recognizing samples of one sample series. Based on the results the forming properties of Optim 650 MC are almost in same category as Optim 700 MC Plus or even a little better. The hole expansion ratio was clearly remarkably better on Optim 650 MC, so you can state that there would surely be other applications to be utilized nowadays. On the other hand Optim 700 MC Plus can also be offered to replace Optim 650 MC, because forming properties are so close to each other and there is even more strength on Optim 700 MC Plus. So remarkable benefit is gained from formability tests, in order to offer right material to customers to meet their need.</p>	
Keywords: FLC, hot-rolling, steel, forming, formability, sheet metal	

SISÄLLYS

Alkusanat	I
Tiivistelmä	II
ABSTRACT	III
SISÄLLYS	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1 JOHDANTO	1
2 Teräksen Muokkaaminen	2
2.1 Kuumavalssaus	2
2.1.1 Valssaimia	3
2.1.2 Termomekaaninen valssaus	4
2.2 Optim 650 MC-teräksen kuumavalssausprosessi	5
2.3 Kylmämuovaus	6
2.3.1 Venytysmuovaus	7
2.3.2 Syväveto	8
3 Terästen muovausominaisuudet	9
3.1 Mekaaniset ominaisuudet	9
3.2 MuokkauslujittumisekspONENTTI n	10
3.3 Plastinen venymäsuhde r	10
3.4 Rajavetosuhde LDR	11
3.5 Rajamuovattavuuspiirros (FLD)	12
3.6 Erichsenin luku	16
4 Hyviä muovausominaisuuksia vaativia käyttökohteita	17
4.1 Autoteollisuus	17
4.2 Muut käyttökohteet	18
4.3 Uusia mahdollisia käyttösovellutuksia	19
5 Tärkeimmät testit muovattavuustutkimuksessa	20
5.1 Muovauskoetulosten hyödyt	20
5.2 Nakajima-testi	21
5.3 Erichsenin kuppivenytyskoe	22
5.4 Reiänlaajennustesti	23
5.5 Vetokoe	25
6 Kokeellinen osuus	27
6.1 Koemateriaali	27
6.2 IE-luvun määrittäminen	27
6.3 Reiänlaajennussuhteen määrittäminen	29
6.3.1 Reiät poraamalla	29
6.3.2 Standardin mukaisesti reiät lävistämällä	30
6.4 Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen	30
7 Tulokset	32
7.1 IE-luku	32
7.2 Reiänlaajennussuhde	32
7.3 FLC-käyrä	33
8 Tulosten tarkastelu	35
8.1 IE-luku	35
8.2 Reiänlaajennussuhde	36

8.2.1 Reiät poraamalla.....	36
8.2.2 Reiät lävistämällä standardin mukaisesti	37
8.3 FLC-käyrä	38
8.4 Tulosten vertailu Optim 700 MC Plus -teräkseen.....	39
8.5 Yhteenveto	41
9 POHDINTA	43
10 LÄHDELUETTELO	45
11 LIITELUETTELO.....	47

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

FEM	Numeeriset laskelmat
FLD	Rajamuovattavuuspiirros (Forming Limit Diagram)
FLC	Rajamuovattavuuskäyrä (Forming Limit Curve)
IE	Erichsenin luku [mm]
LDR	Rajavetosuhde (Limiting drawing rate)
n	Muokkauslujittumiseksponentti
r	plastinen venymäsuhde
$R_e/R_{p0,2}$	Myötöraja/ Myötölujuus [MPa]
Rm	Murtoraja [MPa]
SuRO	Superterästen Rakenteiden Optimointi
TKI	Tutkimus Kehitys Innovaatiot

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön TKI-osaston materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmä ja työ tehdään osana Superterästen Rakenteiden Optimointi 2 (SuRO2) projektia.

Opinnäytetyössä tutkitaan Raahen Rautaruukin kuumavalssausnauhalinjalta termomekaanisesti valssatun 3 mm vahvuisen Optim 650 MC -teräksen muovattavuutta ja verrataan tuloksia Optim 700 MC Plus-teräksen muovausominaisuuksiin.

Teoriaosuudessa selvitetään pääpiirteet teräksen muokkaamisesta, keskittyen aiheen mukaisesti kuumavalssaukseen sekä kylmämuovaukseen. Lisäksi selvitetään yleisesti kuumavalssattujen terästen muovausominaisuudet, sekä käyttökohteita hyviä muovattavuusominaisuuksia vaativille teräksille. Selvitystä tehdään myös mahdollisista uusista sovelluskohteista, joissa vaaditaan hyvää muovattavuutta ja lujuutta. Työssä selvitetään myös muovaustutkimuksen hyödyt sekä tärkeimmät käytettävät testausmenetelmät.

Kokeellisessa osuudessa suoritetaan Nakajima-testit rajamuovattavuuskäyrän (FLC) määrittämistä varten, sekä Erichsenin kuppikoetesti ja reiänlaajennustesti. Tuloksia verrataan Ruukin Optim 700 MC Plus teräkseen.

Tavoitteena on muodostaa teräksen Optim 650 MC rajamuovattavuuskäyrä Nakajima-muovattavuuskokeiden ja ARAMIS-mittaustulosten avulla. Lisäksi selvitetään Erichsenin luku (IE) kupinvenytyskokeella sekä selvitetään reiänlaajennussuhde reiänlaajennustestillä. Tavoitteena on myös oppia käyttämään rajamuovattavuustutkimuksessa tarvittavia testauslaitteita, sekä oppia ymmärtämään ja tekemään rajamuovattavuustutkimus.

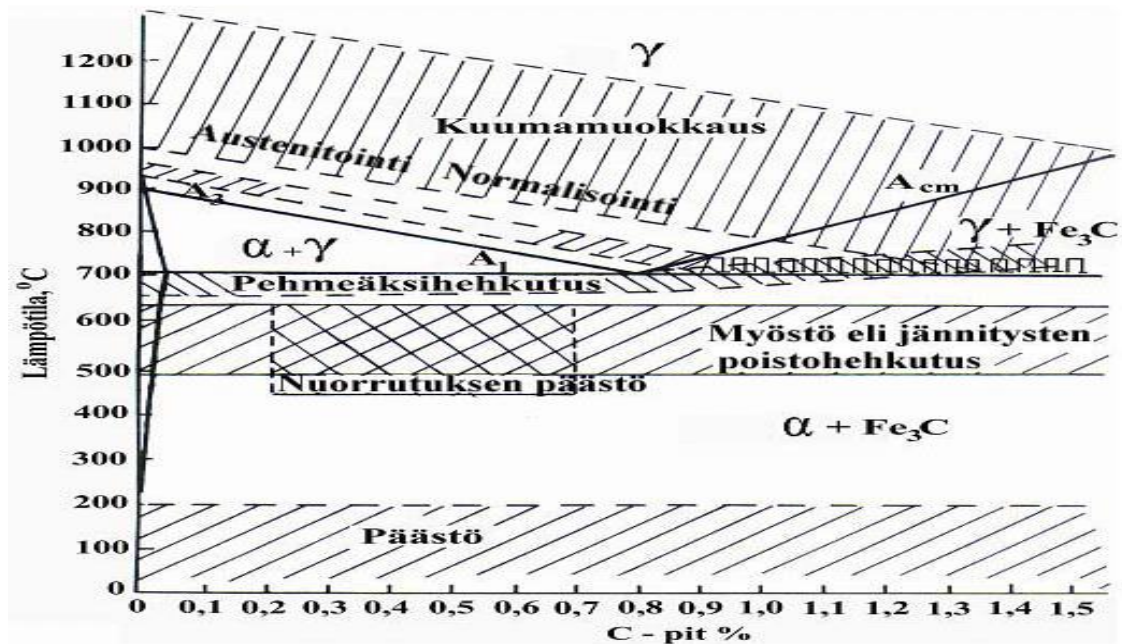
Rajamuovattavuustutkimus tehdään 3 mm vahvuiselle Optim 650 MC-teräkselle, jonka tuloksia verrataan Ruukin Optim 700 MC Plus-teräksen ominaisuuksiin. Tehtäviä testejä ovat Erichsenin kuppikoetesti standardin ISO 20482 mukaan, reiänlaajennus standardin ISO 16630 mukaan ja FLC käyrän muodostaminen Nakajima -testin avulla standardin ISO 12004-2 mukaan. Tutkimusmateriaalit toimittaa Rautaruukki Oyj ja testausnäytteet valmistetaan Tornion JaloTeräsStudiolla.

2 TERÄKSEN MUOKKAAMINEN

Teräksiä on muokattu erilaisin keinoin keskiajalta lähtien, mutta tässä työssä keskitytään rajauksen mukaisesti kuumavalssaukseen ja kylmämuovaukseen.

2.1 Kuumavalssaus

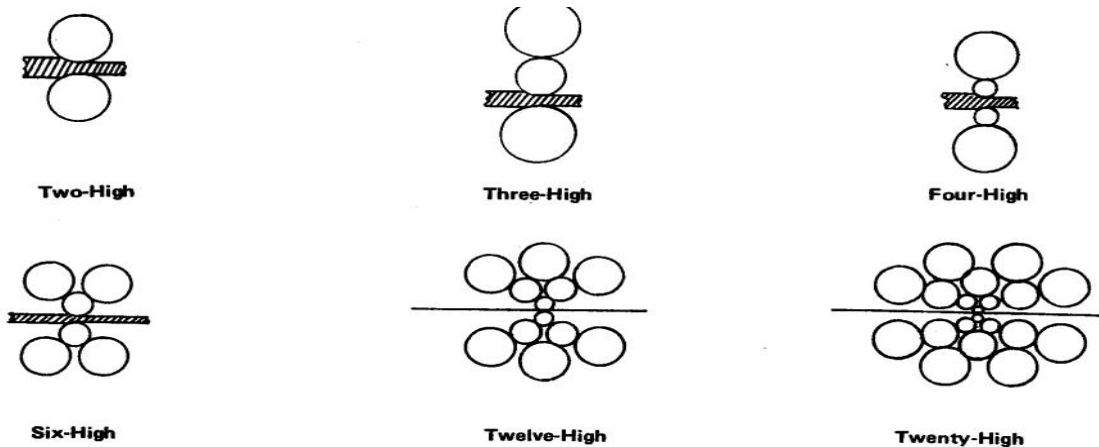
Kuumavalssauksen normaali aloituslämpötila on 1250 °C, tällöin ollaan kokonaan austeniittialueella. Teräksen mikrorakenteessa tapahtuu muutoksia: austeniitti rekristallisoituu eli uudelleenkiteytyy. Muokkauslujittumista ei tapahdu rekristallisoitumisen vuoksi, ja näin ollen terästä voidaan muokata pienilläkin valssausvoimilla. Lämpötilalla jossa muokkaus lopetetaan on suuri merkitys, koska teräksen raerakenne ja siten lujuusominaisuudet määräytyvät sen mukaan. Alieutektoidisilla teräksille eli hiilipitoisuus alle 0.8 % muokkaamista tulisi jatkaa A_3 –lämpötilaan saakka (Kuva1), jottei ferriittiä pääse muodostumaan rakenteeseen. Ylieutektoidisilla teräksillä hiilipitoisuus yli 0.8 % muokkausta tulisi jatkaa A_{cm} –lämpötilan alapuolelle (Kuva1), jottei pääsisi syntymään karbidiverkkoa raerajoille. (Kivivuori Seppo & Härkönen Seppo 2009. Lämpökäsittelyoppi. Tampere.)



Kuva 1. Terästen lämpökäsittelyn alueet. (Kivivuori Seppo 2011. Lämpökäsittelyn perusteet Hakupäivä 8.2.2012.)

2.1.1 Valssaimia

Koska kuumavalssauksessa materiaali on kuumamuokkausalueella, valssaimet eivät ole kovinkaan monimutkaisia. Kun taas kylmävalssauksessa tarvitaan enemmän voimaa ja siten isompia tukivalssirakenteita. Yksinkertaisin valssain on pari eli duo-valssain, jossa on kaksi työvalssia ja monimutkaisin on 20-valssi (sendzimer-valssain). Kolmivalssi mahdollistaa sen, ettei tarvitse muuttaa valssien pyörimissuuntaa nostettaessa kappaletta kahden valssikidan välillä. Kuvassa 2 on yksinkertaistettuja mallikuvia valssaimista ja niiden tukirakenteista. (Viljamaa Ahti 2010. Muokkaavia ja muovaavia valmistusmenetelmiä. Hakupäivä 8.2.2012.)



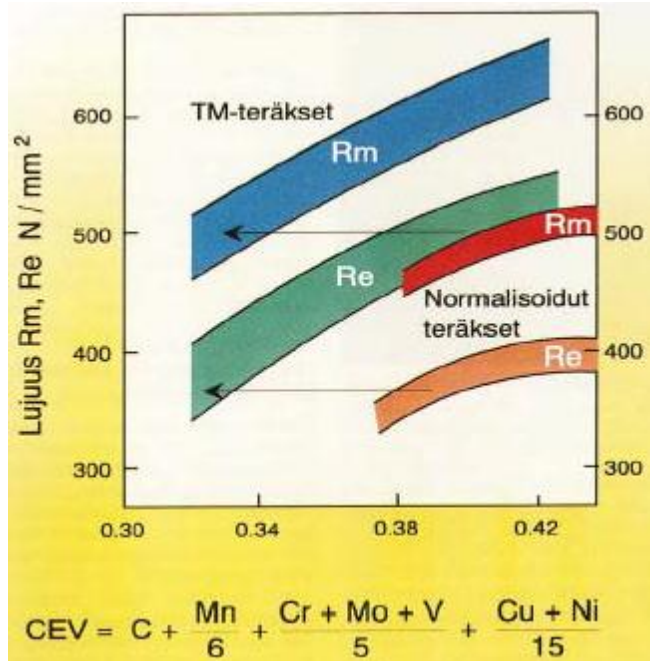
Kuva 2. Parivalssi, kolmivalssi, nelivalssi, kuusivalssi, 12-valssi, 20-valssi. (Viljamaa Ahti 2010. Muokkaavia ja muovaavia valmistusmenetelmiä. Hakupäivä 8.2.2012.

2.1.2 Termomekaaninen valssaus

Teräksen lujuutta, muovattavuutta sekä hitsattavuutta on aina haluttu parantaa ja tähän tarpeeseen termomekaaninen valssaus vastaa todella hyvin. Termomekaanisessa valssauksessa säädellään valssauslämpötilaa, muokkausastetta sekä valssauksen jälkeistä jäähtymistä. Termomekaanisessa valssauksessa viimeistelyvalssaus suoritetaan tarkoin määritellyssä lämpötilassa, jossa ei tapahdu rekristalloitumista. Alhaisemman lämpötilan vuoksi myös valssausvoimat kasvavat, mutta esimerkiksi niobi-seostuksen avulla valssauslämpötilaa saadaan korkeammaksi ilman rekristalloitumista. (Thermomechanical control process. Hakupäivä 9.2.2012; Kesti Vili, 2010 Mikrorakenteen vaikutus lujan teräksen särmäys ja muovattavuusominaisuuksiin. Diplomityö.)

Termomekaanisella valssauksella tehdyillä teräksillä myötöraja R_e on paljon lähempänä murtorajaa R_m :ää kuin normaalisti kuumavalssatuilla normalisoiduilla teräksillä. (Kuva 3) Termomekaaninen valssaus on myös kustannustehokasta, koska teräksen seostusta voidaan vähentää menettämättä lujuus-, muovattavuus- tai hitsattavuusominaisuuksia. Myös aihoiden läpimenoaika voidaan lyhentää, kun ei tarvita enää kalliita ja hitaita teräksen jälkikäsittelytoimenpiteitä sekä käyttämällä nopeutettua jäähdystystä. Molemmat tässä tutkimuksessa käytettävät teräkset on myös valmistettu termomekaanisesti valssaamalla Raahen Rautaruukin terästehtaalla kuumanauhavalssauslinjalla. (Väyrynen Jukka. Tuoteohjelma 2011 Kuumavalssatut teräkset Raahen tehtaalta. Hakupäivä

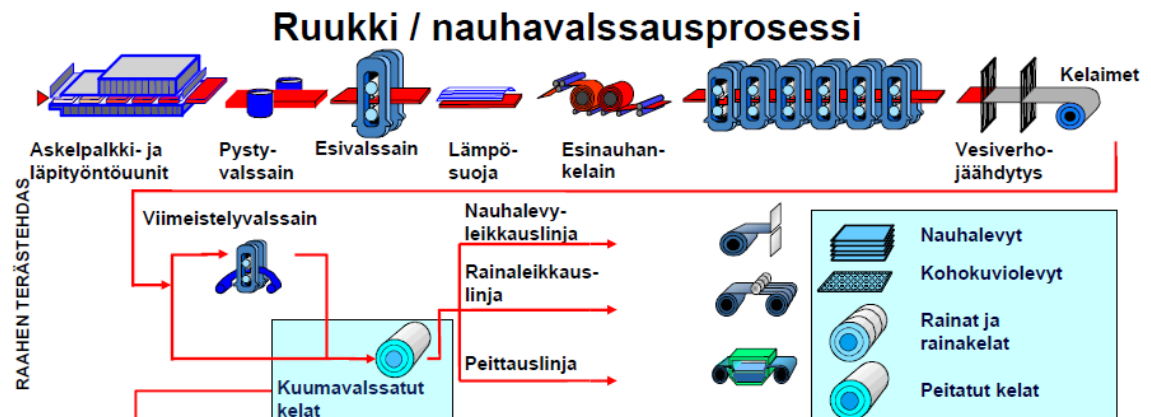
6.2.2012; Kesti Vili, 2010 Mikrorakenteen vaikutus lujan teräksen särmäys ja muovattavuusominaisuuksiin. Diplomityö.)



Kuva 3. Kvarttolevyt, Normalisoidut teräkset ja TM-teräkset. Lujuusarvojen ja hiilikvivalentti arvojen yhteys. Kuumavalssattu teräs rinnastuu normalisoituun teräkseen. (Väyrynen Jukka. Tuoteohjelma 2011 Kuumavalssatut teräkset Raahen tehtaalta. Hakupäivä 6.2.2012.)

2.2 Optim 650 MC-teräksen kuumavalssausprosessi

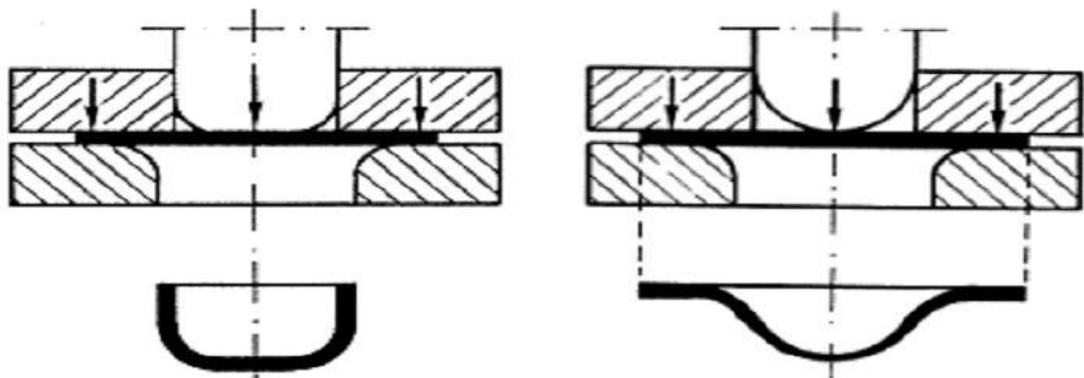
Aihio lämmitetään askelpalkkiuunissa valssauslämpötilaan. Seuraavassa vaiheessa aihio ajetaan pystyvalssaimelle, jolla saadaan aihioon haluttu leveys. Seuraavana aihio ajetaan esivalssaimen, missä saavutetaan haluttu esinauhan paksuus. Kun haluttu paksuus on saavutettu, nauha kelataan esinauhankelaimella kelalle. Esinauhakelaimesta nauha syötetään kuusituoliseen nauhavalssaimen, jolla saavutetaan nauhan haluttu lopullinen paksuus. Tämän jälkeen nauha jäähdytetään vesiverhojäähdytyksellä ja kelataan kelalle kuumanauhakelaimella. Jatkotoimenpiteet riippuvat siitä, minkälaista ja minkä laatuista nauhaa halutaan. Yksinkertaistettu prosessikaavio Raahen nauhavalssausprosessista on esitetty kuvassa 4. (Kauppi Timo 2005. Materiaalioppi 1 luentomateriaali pdf.)



Kuva 4. Kuumanauhavalssaus Raahen terästehtaalla. (Kauppi Timo 2005. Materiaalioppi 1 luentomateriaali pdf.)

2.3 Kylmämuovaus

Kylmämuovaus tehdään huoneenlämmössä ja siinä pyritään muovaamaan kappale halutun muotoiseksi ilman vaurioita sekä ilman liiallista seinämien ohenemista. Kylmämuovattujen tuotteiden etuja ovat hyvä lujuus, pinnanlaatu, mittatarkkuus sekä nopea valmistaminen. Kylmämuovausmenetelmiä on useita mutta tässä työssä keskitytään levynmuovauksen kahteen menetelmään venytysmuovaukseen ja syvävetoon. (Kuva 5.) Kylmämuovata voi lähes mitä tahansa materiaalia, muovauksen määrään vaikuttaa materiaalin mekaaniset- sekä muovausominaisuudet. (Kivivuori Seppo 2008. Muokkaustekniikan perusteet. Hakupäivä 13.2.2012.)

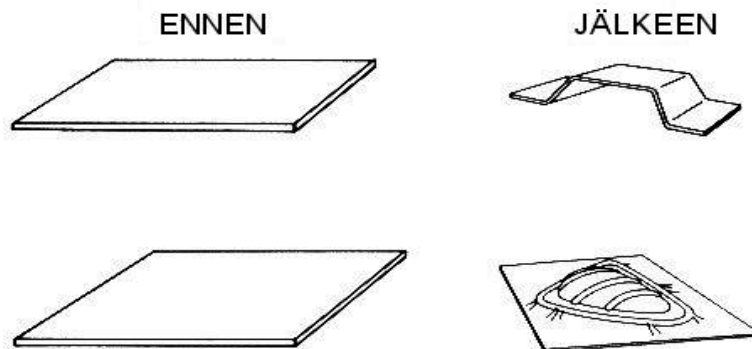


Kuva 5. Syvävedon (vasemmalla) ja venytysmuovauksen (oikealla) periaate kaaviollisesti esitettyinä. (Kivivuori Seppo 2006. Levynmuovauksen menetelmät ja perusteet. Ohutlevy 2.)

2.3.1 Venytysmuovaus

Kun halutaan osia/ tuotteita, joissa on suuri pyöristyssäde, käytetään venytysmuovausta esimerkiksi lentokoneen rakennusosat tai arkkitehtoniset koristeosat. Venytysmuovauksessa aihion reunojen luistaminen on estetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla. (Kuva 6.) Aihio venyy sekä säteen että tangentin suunnassa, koska se ei pääse liukumaan vetorenkaan yli. Levy ohenee ja pinta-ala kasvaa. Koska levy ohenee ja repeämisvaara kasvaa, ei venytysmuovauksella saada aikaan yhtä syviä muotoja kuin syvävedolla. Yleensä venytysmuovaus tehdäänkin yhdessä syvävedon kanssa esimerkiksi silloin, kun halutaan vaikka kuperapohjaisia tuotteita.

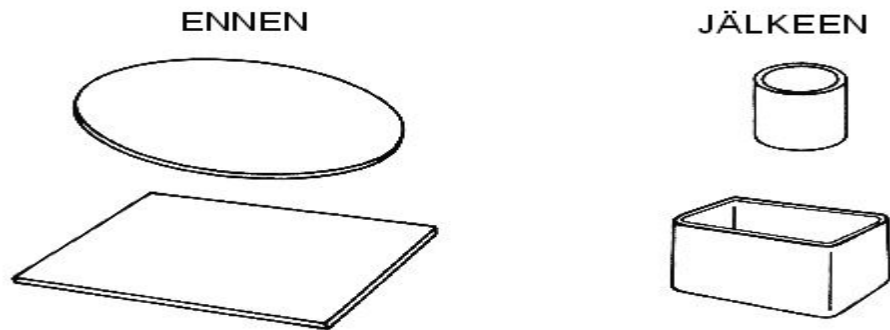
Venytysmuovattavuutta tutkitaan usein esimerkiksi Erichsenin kokeella, jolla saadaan määritettyä venytysmuovattavuutta kuvaava parametri Erichsenin luku IE. Mitä suurempi IE luku on, niin sitä parempi venytysmuovattavuus materiaalilla. Tässäkin tutkimuksessa tullaan tekemään Erichsenin kuppivenytyskoe tutkimusmateriaalille, kokeen tarkempi määrittäminen myöhempanä. (Kivivuori Seppo 2011. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012.)



Kuva 6. Kaaviokuva venytysmuovauksesta. Aihion reunojen luistaminen on estetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla. (Kivivuori Seppo 2006. Levynmuovauksen menetelmät ja perusteet. Ohutlevy 2.)

2.3.2 Syväveto

Syvävedossa levyaihiosta muokataan astiamaisia tai kuppimaisia tuotteita, joiden seinämänpaksuus ei muutu. Vedon aikana painin pakottaa aihion liukumaan pidätinrenkaan ja vetorenkaan välistä kuppimaiseksi tuotteeksi. (Kuva 7.) (Kivivuori Seppo 2011. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012.)



Kuva 7. Kaaviokuva syvävedosta.(Kivivuori Seppo 2011. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012.)

3 TERÄSTEN MUOVAUSOMINAISUUDET

Tässä luvussa selvitetään terästen yleiset ominaisuudet, joilla ilmoitetaan mm. teräksen muovattavuutta.

3.1 Mekaaniset ominaisuudet

Myötörajalta tai Myötölujuudella $R_{p0,2}$:lla on iso merkitys, koska se pitää ylittää, jotta päästään plastisen muodonmuutoksen alueelle, mikä on muovaamisen lähtökohta. 0,2 nimitys tulee siitä jännityksestä, jolla saadaan aikaan 0,2 % pysyvä muutos. Terästen myötörajaan voidaan vaikuttaa monin tavoin, kuten seostusta muuttamalla ja vaikkapa termomekaanisesti valssaamalla. Tutkimuksessa olevan Optim 650 MC myötölujuus on 650 MPa (Taulukko1.) ja siten se on ultraluja teräs >550 MPa.

Murtolujuudella R_m tarkoitetaan rajaa, jonka jälkeen esimerkiksi koesauva vetokokeessa alkaa kuroutua ja lopulta katkeaa. Myötösuhdetta $R_{p0,2}/R_m$ käytetään usein kuvaamaan aineen sitkeyttä. Mitä lähempänä ykköstä sitä parempi, joissakin käyttösovelluksissa 0,7 pidetään jo riittävänä sitkeytenä.

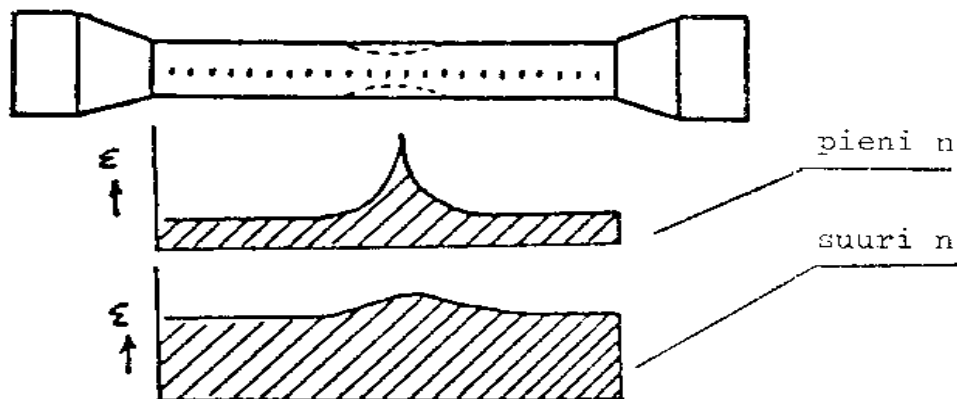
Murtovenymää A_5 käytetään myös sitkeyden ilmaukseen. Murtovenymä ilmoitetaan prosentteina alkuperäisestä mittapituudesta Optim 650 MC:llä 15 %. (Taulukko 1.) Koska murtovenymään sisältyy myös kurouma-alueen venymä, joka riippuu sauvan geometriasta, niin murtovenymää ei voida pitää materiaalivakiona. Murtovenymä on helppo määrittää ja siten helppo käyttää materiaalien sitkeyden vertailemiseen. (Lar-kiola Jari 2006. Metallien muovaus. VTT tuotteet ja tuotanto osa1 pdf.)

Taulukko 1. Optim MC rakenneteräkset mekaaniset ominaisuudet. (Optim-MC rakenneteräkset pdf. Ruukki.fi. Hakupäivä 8.2.2012)

Teräslaji	Paksuus mm	Myötölujuus R_{eH} tai $R_{p0,2}$ MPa Vähintään	Murtolujuus R_m MPa	Murtovenymä % Vähintään $A_{80}^{(1)}$ A_5	Iskusitkeys Pitkittäinen vähintään t °C Charpy V J
Optim 500 MC	2.0 - 12	500	560 - 690	14 18	-20 40
Optim 550 MC	2.2 - 10	550	600 - 760	13 17	-20 40
Optim 600 MC	2.2 - 10	600	650 - 810	12 16	-20 40
Optim 650 MC	2.5 - 10	650 ⁽²⁾	700 - 860	12 15	-20 40
Optim 700 MC	3.0 - 10	700 ⁽²⁾	750 - 930	15	-20 ⁽³⁾ 40 ⁽³⁾
Optim 700 MC Plus	6.0 - 12	700 ⁽⁴⁾	750 - 930	15	-60 40

3.2 Muokkauslujittumiseksponentti n

Muokkauslujittumiseksponentti n kuvaa materiaalin venytysmuovattavuutta. Mitä isompi n -arvo on, sitä suurempi lujittuminen ja näin ollen sitä ohuemmaksi voi tuotteen venyttää sen murtumatta. Hyvän n -arvon omaavissa materiaaleissa venyminen laajenee isommalle alueelle, kun taas huonomman n -arvon omaavissa venyminen tapahtuu enemmän yhdessä paikassa ja ratkeamisen vaara on isompi. (Kuva 8.) . (Kivivuori Seppo 2008. Muokkaustekniikan perusteet. Hakupäivä 13.2.2012.)



Kuva 8. Muokkauslujittumisen vaikutus materiaalin venymään. (Kivivuori Seppo 2008. Muokkaustekniikan perusteet. Hakupäivä 13.2.2012.)

3.3 Plastinen venymäsuhde r

Kun tarkastellaan materiaalia muovaukseen sopivaksi, plastinen venymäsuhde r ja muokkauslujittumiseksponentti n ovat ne arvot, joita tarkastellaan ensin. Plastinen ve-

venymäsuhde r määritellään vetokokeessa tapahtuvan poikittais- ja paksuussuuntaisen venymän suhteeksi. (Kaava 1) Kun r -arvo on 1 eli venyy joka suuntaan saman verran materiaali on isotrooppinen. Parasta muokkauksen kannalta olisi kuitenkin anisotrooppinen materiaali, jolla r -arvo on 1,6-1,9. Tällöin voidaan materiaalista vetää syvempiä tuotteita, jolloin levyn paksuus voi muuttua veto- ja pidätinrenkaan välissä rasittamatta liikaa kupin seinämää. (Kivivuori Seppo 2011. Teräsohutlevyjien muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012).

$$r = \frac{\varepsilon_{\text{poikittainen}}}{\varepsilon_{\text{paksuus}}} \quad (1)$$

missä r on plastinen venymäsuhde

$\varepsilon_{\text{poikittainen}}$ on koesauvan leveyssuuntainen plastinen venymä.

$\varepsilon_{\text{paksuus}}$ on koesauvan paksuussuuntainen plastinen venymä.

(Kivivuori Seppo 2011. Teräsohutlevyjien muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012)

3.4 Rajavetosuhde LDR

Rajavetosuhdetta pidetään yleensä syvävedettävyyden mittana. R -arvolla on huomattava merkitys rajavetosuhteelle, mitä suurempi r -arvo, sitä suurempi on myös rajavetosuhde. Yksinkertainen määritelmä rajavetosuhteelle on suurimman mahdollisen aihion halkaisijan D suhde kupin halkaisijaan d , jolla saadaan syvävedettyä ehjä kuppi. (Kuva 9). Usein yhdellä vedolla ei saada valmista tuotetta, vaan joudutaan käyttämään jatkovetoja. Tällöin rajavetosuhde pienenee huomattavasti, välihehkutuksella rajavetosuhteen saa kuitenkin palautettua lähes ennalleen. (Kivivuori Seppo 2011, Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Teräsohutlevyjien muovattavuus ja materiaalilaadut.)

$$\text{LDR} = D/d. \quad (2)$$

missä LDR on rajavetosuhde, D suurin mahdollinen aihio ja d suurin mahdollinen kupin halkaisija.

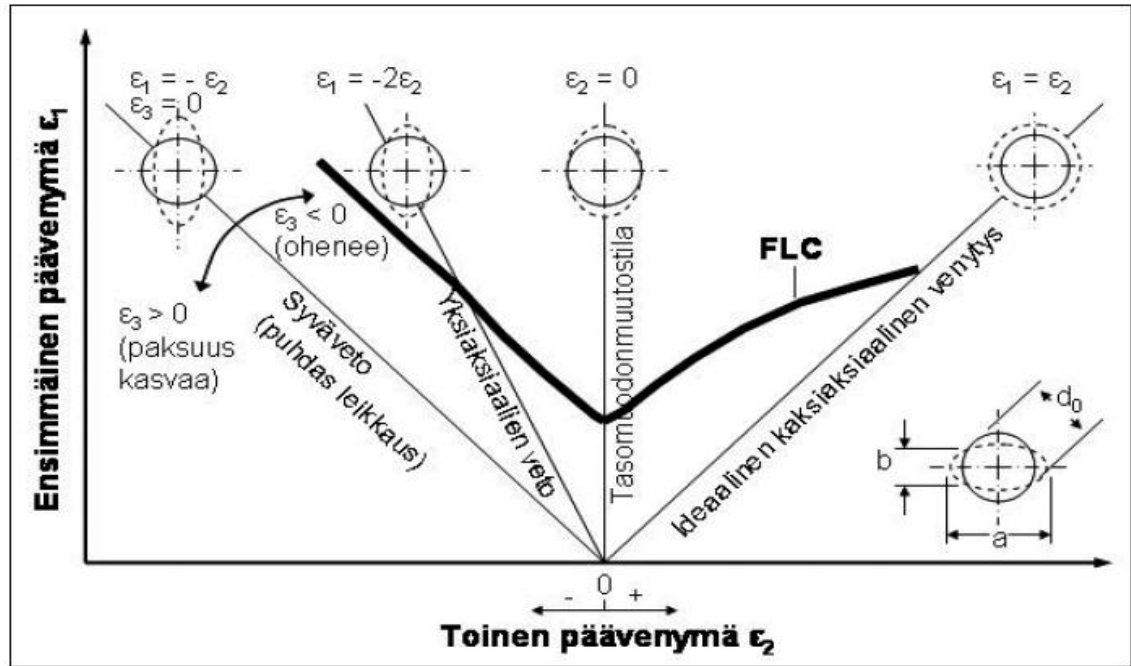


Kuva 9. Vasemmalla suurin aihio, joka on voitu vetää oikealla olevaksi kupiksi. (Kivivuori Seppo 2011, Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut.)

3.5 Rajamuovattavuuspiirros (FLD)

Yksi tärkeimmistä tavoista, jolla voidaan kuvata ohutlevyjen muovattavuutta, on rajamuovattavuuspiirros. (Kuva10.) Piirrosta käytetään niin numeeristen laskelmien vertailukohtana, kuin ohutlevymateriaalien valinnassa ja valmistettavuuden arvioinnissakin. Piirrokseen on piirretty jokaiselle ohutlevymateriaalille ominainen rajamuovattavuuskäyrä FLC, joka tullaan piirtämään myös tässä rajamuovattavuustutkimuksessa olevalle Optim 650 MC -teräkselle. FLC erottaa toisistaan onnistuneet ja murtumaan johtaneet muovaukset.

Yleensä piirros piirretään päävenymäkoordinaatistoon, jossa pystyakselilla on ensimmäinen päävenymä ε_1 ja vaaka-akselilla toinen päävenymä ε_2 . Positiivinen merkitsee venyttävää muodonmuutosta, eli rajamuovattavuuspiirroksen pystyakselin oikeanpuoleista puoliskoa kutsutaan venytysmuovauspuoleksi. Negatiivinen merkitsee puristavaa muodonmuutosta, eli piirroksen vasemmanpuoleista puoliskoa kutsutaan syvävetopuoleksi. Rajamuovattavuuskäyrän alapuolella tapahtuva muokkaus on turvallisella alueella, jolloin kappaletta voidaan muokata sen vaurioitumatta, yleensä käytetään kuitenkin turvamarginaalia, joka on noin 10 % alempana kuin määritetty FLC. (Kuvat 10,12.) (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2.)



Kuva 10. Rajamuovattavuuspiirros päävenymäkoordinaatistossa. (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2.)

Muovauksessa ohutlevyaihioon piirretyn ympyräverkkokuvion ympyrät muuntuvat ellipseiksi. Ellipsien siirtymiä tarkastelemalla voidaan päävenymät ilmentää helposti. Päävenymien arvot voidaan laskea ellipsin iso- ja pikkuakselin pituuksien a ja b sekä alkuperäisen ympyrän halkaisijan d_0 avulla, ja ilmaista suhteellisina venyminä $\varepsilon_{1,2}$ kaavojen 3 ja 4 avulla tai todellisina venyminä $\varepsilon_{1,2,tod}$ kaavojen 5 ja 6 avulla.

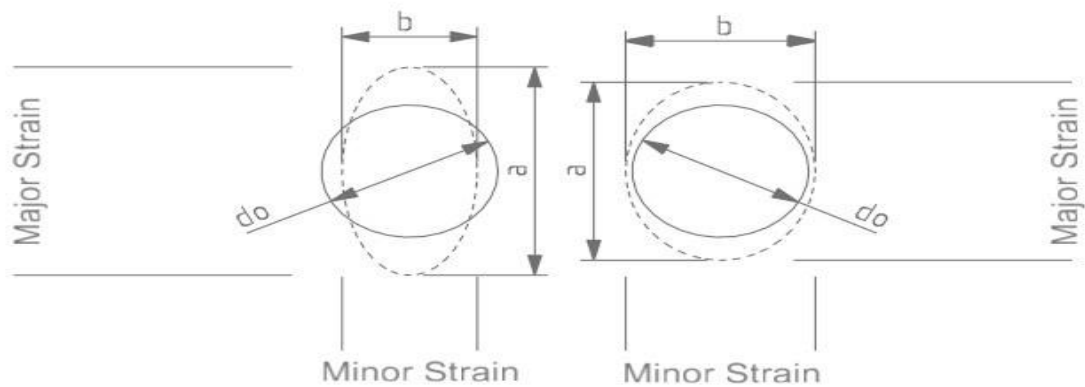
$$\varepsilon_1 = \frac{a-d_0}{d_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{b-d_0}{d_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{1,tod} = \ln\left(\frac{a}{d_0}\right) \quad (4)$$

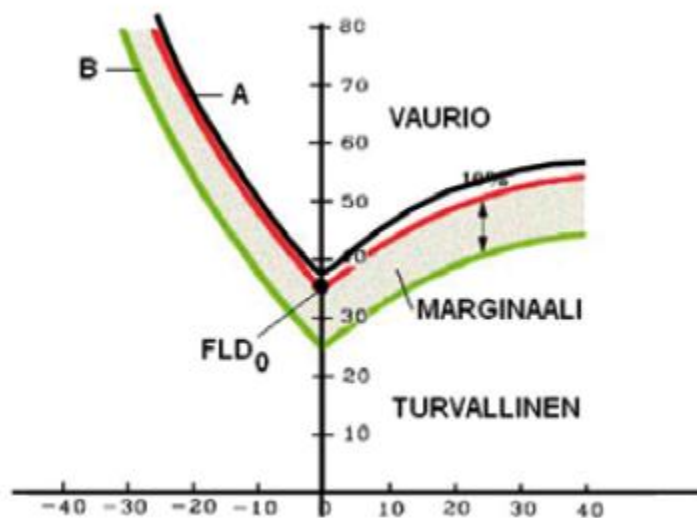
$$\varepsilon_{2,tod} = \ln\left(\frac{b}{d_0}\right) \quad (5)$$

,missä $\varepsilon_{1,2}$ ovat suhteelliset venymät, $\varepsilon_{1,2,tod}$ ovat todelliset venymät, a on ellipsin isoakselin pituus, b pikkuakselin pituus, d_0 ympyrän halkaisija, \ln on luonnollinen logaritmi. (Kuva 11.) (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2)



Kuva 11. Ellipsien iso- ja pikkuakselit. (Juntunen Päivi, 2010 Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö)

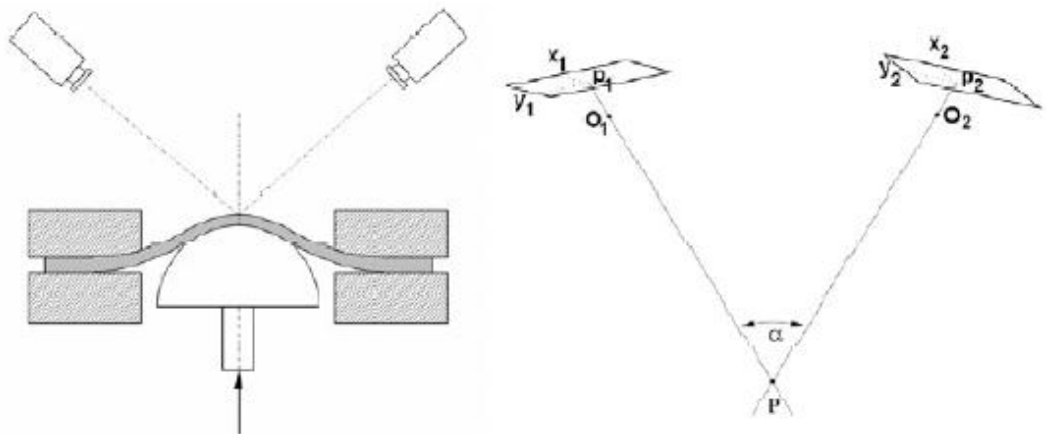
Rajamuovattavuuskäyrän ja pystyakselin leikkauspistettä merkitään usein tunnuksella FLD_0 (Kuva 12.), jonka läheisyydessä yleensä muovatun kappaleen murtuma esiintyy. Tätä rajamuovattavuuskäyrän alinta kohtaa nimitetään myös tasonmuodonmuutosalueeksi, jolloin toinen päävenymä ε_2 häviää. (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2.)



Kuva 12. Murtumista tai kuroumaa vastaava rajamuovattavuuskäyrä (A) ja suunnittelutyössä käytettävä käyrä (B). (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2.)

Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen

Rajamuovattavuuskäyrä määritetään mittaamalla rajavenymät tietyillä koejärjestelyillä muovatuista koekappaleista. Ennen muovausta koekappaleisiin on tehty ympyräverkkokuvio, jonka siirtymistä venymät määritetään. Vanha ja työteliäs mittaustapa on esimerkiksi mittamikroskoopilla tai mittaviivaimen avulla mittaaminen. Nykyään käytetään mittauslaitteistoja, joiden tietokoneohjelmistot liitettyinä kamerajärjestelmiin (Kuva 13.) mittaavat venymät ja laskevat tulokset muovaustapahtumista. Tässä rajamuovattavuustutkimuksessa käytetään GOM:n ARAMIS-sovellusta 3D-mittausanalyysointia, joka on standardin ISO 12004-2 suositusten mukainen. Tässä rajamuovattavuustutkimuksessa tehtävä FLC-testausmenetelmä on Nakajima-testi ja ympyräverkkokuvioinnin sijaan käytetään stokastista kuviointia, jonka avulla ARAMIS mittaa ja laskee levyn venymiä muovauksen aikana otettujen kuvien perusteella. Ympyräverkkokuvion tai stokastisen kuvioinnin tulee kestää levyn pintaan kohdistuva hankaus pois pyyhkiytymättä. Verkkokuvion koko tai stokastisen kuvioinnin kontrasti tulee myös valita tarkkaan käytettävän mittausalueen mukaan. Näytteiden hyvällä ja huolellisella valmisteluilla ohjeiden mukaan on siis suuri merkitys tulosten onnistumisen kannalta. (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2; Juntunen Päivi, 2010 Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.)

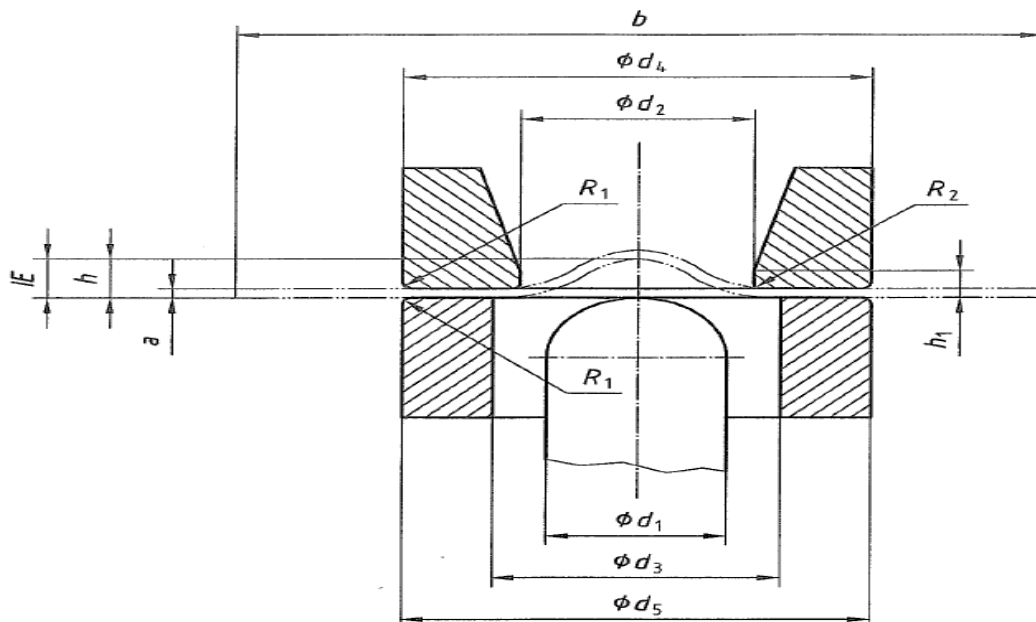


Kuva 13. Periaatekuva kameramittausjärjestelmästä. (Juntunen Päivi, 2010 Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö).

3.6 Erichsenin luku

Yleisesti venytysmuovattavuutta tutkittaessa käytetään Erichsenin koetta, jossa koekappaleeseen aiheutetaan kaksiaalinen jännitys- ja venymätila. Erichsenin kokeen tuloksena saadaan Erichsenin luku IE, joka kuvaa venytysmuovattavuutta. Ja mitä suurempi IE on, sitä parempi venytysmuovattavuus materiaalilla on. (Kivivuori Seppo 2011, Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012)

Erichsenin testin periaatteena on painaa vastinrenkaan ja pitimen välissä olevaa koekappaleita pallomaisella painimella (Kuva 14.), kunnes koekappaleeseen tulee läpimurtuma josta valo tulee läpi. Testin tulos on painuman syvyys mitattuna painimen liikkeen perusteella, mittauksen tarkkuus pitää olla 0,1 mm luokkaa. Testissä suoritetaan vähintään kolme samanlaista painantaa ja Erichsenin luku on näiden testien painaumien syvyyksien keskiarvo. (SFS-EN ISO 20482 2003. Metallilevyjen ja -nauhojen Erichsenin kuppi-venytyskoe. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)



Kuva 14. Erichsenin kuppivenytyskokeen periaate. (SFS-EN ISO 20482 2003. Metallilevyjen ja -nauhojen Erichsenin kuppivenytyskoe. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)

4 HYVIÄ MUOVAUSOMINAISUUKSIA VAATIVIA KÄYTTÖKOhteITA

Tässä luvussa selvitetään missä nykyään käytetään hyviä muovausominaisuuksia omaavia teräksiä, jotka ovat myös ultralujia. Samalla pyritään myös selvittämään missä niitä voitaisiin käyttää jatkossa, niiden parantuneiden muovausominaisuuksien ansiosta.

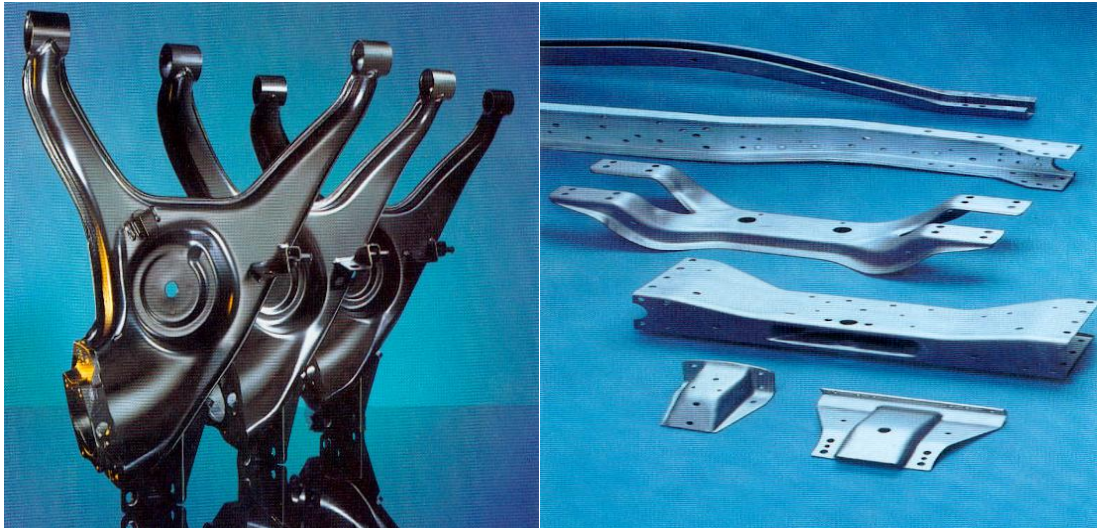
4.1 Autoteollisuus

Polttoaineen kulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi autoteollisuudessa on ratkaisujen keksiminen ollut avainkysymyksenä pitkään ympäristön kannalta. Autojen moottoreita on kehitetty parempaan hyötysuhteeseen, esimerkiksi kitkaa on pyritty vähentämään. Yksi ratkaisumalli on uusien ja parempia ominaisuuksia omaavien kuuma- valssattujen terästen käyttö autojen alustoissa ja muissa alustan osissa. Auton alusta ja muut alustan osat sisältävät jopa 25 % auton kokonaismassasta, joten huomattavia painon vähennyksiä voitaisiin saada aikaan uusilla ultralujilla teräksillä. Painon vähentymisessä myös polttoaineen kulutus vähenee huomattavasti ja samalla tietenkin hiilidioksidipäästötkin. Kuorma-autoille painonvähennyksestä on myös suurta hyötyä, koska autot voivat kuljettaa enemmän kuormaa kerralla yhteismassan säilyessä ennallaan. Turvallisuustekijät ovat myös tärkeä osa autojen alustaa, joten niiden pitäisi olla joustavia ja kestäviä, sekä hyvin muokattavissa monimutkaisen muotojen tekemiseksi. Uudet kuuma- valssatut teräkset vastaavat tähän tarpeeseen, jolloin voidaan käyttää ohuempia levyjä ilman lujuuden menetystä, lisäksi ne ovat myös hyvin muokattavissa. (High strength hot-rolled steel sheets for automobiles 2003. Nippon steel. Hakupäivä 21.2.2012.)

Käyttökohteita

Autojen ohjauksen- ja kallistuksen- vakaaja-tangot, moottorin- ja akseleiden tukivarret, alusta sekä rungon rakenneosat (Kuva 15.), renkaiden vanteet, oikeanlaisella pinnankäsittelyllä vaihdelaatikko, öljynpohja ja monia muita. Paremman lujuuden ansiosta autosta tulee myös rakenteellisesti jäykempi ja näin turvallisempi. Hyvä hitsattavuus on myös yksi tärkeä edellytys mitä vaaditaan, jotta terästä voidaan käyttää autoteollisuudessa.

Metsä- ja maatalouskoneiden sekä liikkuvien nostokurkien kuormankäsittely- ja nostolaitteissa, sekä niiden pitkittäis- ja poikittaispalkeissa voidaan hyödyntää ultralujia muovattavia teräksiä. (ThyssenKrupp steel:n erikoislujat erikoisrakenneteräkset. Hakupäivä 8.2.2012; Mikkonen Pertti 2008. Kuumavalssattujen lujien terästen konepajakäytettävyys pdf.)



Kuva 15. Henkilöautoihin erilaisia tukivarsia ja profiileja. (Patel Jitendra & Klinkenberg Christian & Hulka Klaus. Hot rolled HSLA strip steels for automotive and construction applications. Hakupäivä 22.2.2012.)

4.2 Muut käyttökohteet

Laivanrakennuksessa käytetään paljon ultralujia kuumavalssattuja teräksiä esimerkiksi laivan tukirakenteissa. Öljynporauslautoilla saadaan suurta hyötyä keveämmistä palkkirakenteista, vaikkakin rakenteita pitää muistaa jäykistää, koska ohuemman materiaalin käytön takia nurjahdus vaara on suurempi, kun teräksen kimmomoduuli ei muutu. Kuumavalssatuista teräksistä rakennetaan myös mastoja ja energiansiirtolinjoja. Rakennusten runkorakenteissa, silloissa, putkisilloissa, käytetään ultralujia kuumavalssattuja teräksiä. Arkkitehtuurisestikin muovattavista kuumavalssatuista teräksistä saadaan vaikkapa seinäpaneeleja. (Mikkonen Pertti 2008. Kuumavalssattujen lujien terästen konepajakäytettävyys pdf.)

4.3 Uusia mahdollisia käyttösovellutuksia

Keskipakopumppujen kammioiden syvävetäminen kuumavalssatusta ultralujasta teräksestä voisi olla uusi käyttökohde. Perinteisesti kammiot on valmistettu joko valuraudasta, valuteräksestä tai pronssivalusta. Ruostumattomasta teräksestä syvävedettyjä kammioita on myös ilmestynyt viime aikoina markkinoille (Kuva 16). Ruostumattomat kammiot sopivat varmasti erinomaisesti hygieniaa vaativiin käyttökohteisiin. Keskipakopumppuja käytetään kuitenkin todella paljon myös kaivos- ja prosessiteollisuudessa, jossa ei tarvita hygienia vaatimusten täyttymistä.

Hyvän lujuuden ja hyvien muovausominaisuuksien ansiosta voidaan käyttää ohuempia levyjä ja siksi pumppujen kammioista tulisi kevyempiä, mutta yhtä lujia kuin ennenkin ja kestävämpiäkin, kun hitsausliitosten määrä vähenee. Kammioiden keveys helpottaisi valtavasti kunnossapitoa riippuen tietenkin kammion koosta, mutta sopivan kokoiset voisi vaihtaa uuteen paikan päällä tehtaalla. Valuraudasta valmistetut kammiot pitää normaalisti kuljettaa korjaamolle ja vaihtaa vasta siellä nosturin apua käyttäen. Pumpun hyötysuhde olisi myös parempi pinnanlaadun ansiosta. (Ruostumattoman teräksen muovaamisen mahdollisuudet. Euro inox. Hakupäivä 31.1.2012.)



Kuva 16. Valuraudasta valmistettu kammio sekä Ruostumattomasta teräksestä syvävedetty kammio. (Ruostumattoman teräksen muovaamisen mahdollisuudet. Euro inox. Hakupäivä 31.1.2012.)

5 TÄRKEIMMÄT TESTIT MUOVATTAVUUSTUTKIMUKSESSA

Luvussa selvitetään pääpiirteet niistä testeistä, jotka ovat ehdottomia muovattavuustutkimuksen suorittamiseksi. Samoin selvitetään mitä hyötyä testeistä on yleisellä tasolla.

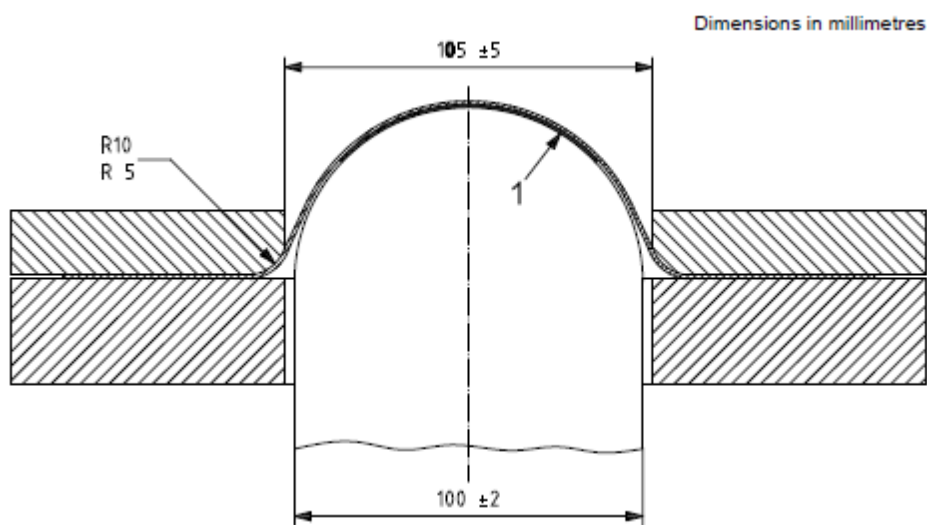
5.1 Muovauskoetulosten hyödyt

Rajamuovattavuuspiirroksen avulla saadaan selville, mikä muovausmenetelmä sopisi parhaiten, mikä ja minkäkokoinen ohutlevy kannattaa valita. Muovaustulosten arviointikin on helpompaa rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Oikeanlaisen ohutlevyn sekä oikeanlaisen muovausmenetelmän valinnalla voidaan tehdä säästöjä, kun voidaan käyttää halvempaa levyä, jonka muovausominaisuudet riittävät. Nykyisin analysoidaan monimutkaisten ohutlevykappaleiden muovausta numeeristen laskelmien (FEM) avulla. Ilman rajamuovattavuuskäyrää numeeristen laskentojen tulosten arviointi olisi vaikeaa, koska ohutlevyn repeytymisen arviointi, olisi todella vaikeaa ilman rajamuovattavuuskäyrää. (Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2).

Levynmuovauksessa on käytettävissä useita eri muovausmenetelmiä, joiden käyttöä rajoittavat materiaalien mekaaniset ominaisuudet. Muovauskoetuloksista saadaan tarkkoja tietoja materiaaliominaisuuksista ja siten pystytään valitsemaan oikea materiaali ja oikea valmistusmenetelmä. Kun osataan valita tarpeen mukaan sopiva materiaali, sillä saadaan merkittäviä säästöjä hinnassa, kun halvemman materiaalin ominaisuudet riittävät, asiakkaita miellyttää aina mahdollinen säästö. Ilman muovauskoetuloksia joudutaan yleensä valitsemaan niin sanotusti varman päälle ja näin kalliimpi materiaali. (Kivivuori Seppo 2006. Levynmuovauksen menetelmät ja perusteet. Ohutlevy 2.)

5.2 Nakajima-testi

Rajamuovattavuuskäyrän määrittämiseen käytetään yleensä joko Nakajima- tai Marciniak-testiä. Tässä työssä tullaan tekemään Nakajima-testit, joten tässä työssä perehdytään tarkemmin siihen. Nakajima-testille on olemassa standardi ISO 12004-2. Standardin mukaan 0,3 mm-4 mm vahvuisten ohutlevyjen muokkauksessa käytetään puolipallon muotoista painintyökalua, jonka halkaisija on (100 ± 2) mm. Pidinrenkaan sisähalkaisijan pitäisi olla vähintään 105 mm, eli suurempi kuin painimen halkaisija plus 2,5 kertaa materiaalin vahvuus. (Kuva 17.)

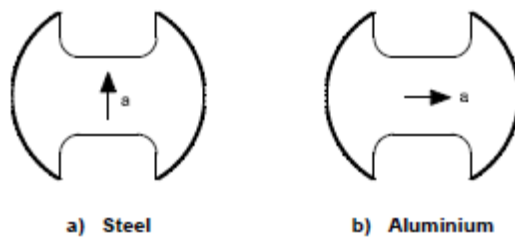


Kuva 17. Nakajima-testin standardinmukaiset työkalujen mitat. (SFS-EN ISO 12004-2 2009. Metallilevyjen ja - nauhojen rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen osa 2. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)

Nakajima testissä pitäisi käyttää vähintään 5 eri geometriaa omaavaa näytettä (Liite1) ja jokaista geometriaa kohti vähintään kolme näytekappaletta. Näytteiden muodon suositeltavasti tulisi olla (kuvan 18.) mukaisesti parallel shaft-tyylisiä, joissa näytteen kavenus on toteutettu yhdensuuntaisella suoralla osuudella. Eri geometrioissa vaihtelee kavennetun kohdan leveys ja näillä eri tuloksilla saadaan pisteet eripuolille FLC-käyrää.

Pääsuunta kaikissa testikappaleissa pitäisi olla matalimman päävenymän suuntaisesti, ja siten myös valssaussuunnan on oltava sama jokaisessa näytteessä. (Kuva 18.) Näytteiden muodon leikkaaminen pitäisi toteuttaa menetelmällä, josta ei aiheudu näytteen pintaan tai reunoihin naarmuja eikä muita materiaalin ominaisuuksiin vaikuttavia asioita, tässä työssä näytteet leikataan laserilla. Mikäli työstön aikana sattuisi jotain edellä mai-

nituihin, olisi sillä testin kannalta merkittäviä vaikutuksia, eikä testi olisi enää luotettava. Näytteiden pinnat tulee puhdistaa, jonka jälkeen ne kuvioidaan joko ympyräverkkokuviolla tai stokastisella (satunnaisella) kuviolla. Koska tässä työssä käytetään optista venymämittausanalysaattoria, tehdään kuviointi stokastisella spraymaalauksella. (SFS-EN ISO 12004-2 2009. Metallilevyjen ja – nauhojen rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen osa 2. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)



Kuva 18. Yhdensuuntaisilla suorilla osuuksilla kavennetut näytemuodot, joissa on merkitty käytettävä valssaussuunta a) teräkselle ja b) alumiinille. (SFS-EN ISO 12004-2 2009. Metallilevyjen ja – nauhojen rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen osa 2. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS)

Kuvioituja ohutlevynäytteitä painetaan painimella $1,5 \pm 0,5$ mm/s niin kauan, että näyte murtuu, testauslämpötila on (23 ± 5) °C. Aihion liukuminen muovauksen aikana pitää estää mahdollisimman hyvin, jotta varmistetaan lähes lineaarinen venymäpolku. Liukumisen estämiseksi pitää käyttää riittävän suurta voimaa, jolla puristetaan pidinrenkaita ja mahdollisesti käyttää pyällettyjä pidinrenkaita. Riippuen materiaalin vahvuudesta ja tarvittavasta voimasta, tulee kitkan vaikutus estää mahdollisimman hyvin käyttäen oikeanlaista voitelua sekä muovikalvoa. Jotta koe olisi onnistunut, pitää murtuman sijaita korkeintaan 15 mm:n etäisyydellä muovatun kuvun laelta. (SFS-EN ISO 12004-2 2009. Metallilevyjen ja – nauhojen rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen osa 2. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)

5.3 Erichsenin kuppivenytyskoe

Testin määritelmä löytyy aiemmasta kappaleesta 3.6. Erichsen-testistä on myös kehitetty parempi testi Bulge–pullistustesti, jossa painimen ja koekappaleen välinen kitka on saatu minimiin käyttämällä painintyökaluna öljynpainetta ja näin testin koetulos on tar-

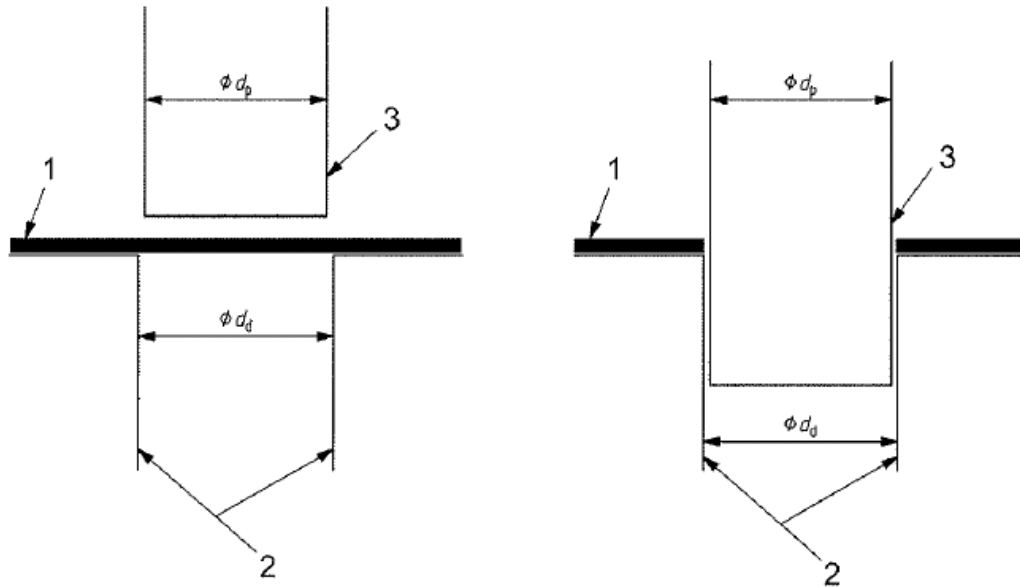
kempi ja virheen mahdollisuus pienempi. Bulge-testille ei kuitenkaan ainakaan vielä ole standardia ja koska tässäkin työssä suoritetaan Erichsen-testi, niin työssä perehdytään siihen tarkemmin.

Koekappaleen tulee olla tasomainen ja mitoiltaan sellainen, ettei painuman keskipiste ole 45 mm lähempänä koekappaleen reunaa eikä 90 mm lähempänä muiden painumien keskipistettä. Samoin kuin Nakajima-testissä ei tässäkään kokeessa saa olla koekappaleessa jäysteitä tai taipumia, mitkä haittaisivat kappaleen kiinnittämistä tai muuten vaikuttaisi kokeen tulokseen. Kokeessa on normaaliolosuhteet lämpötila-alueella 10–35 °C.

Koekappaleen paininta ja vastinrengasta vasten tulevat pinnat voidellaan ohuesti ennen koetta standardin suosittelemalla grafiittirasvalla. Koekappaletta puristetaan noin 10 kN voimalla ja painin asetetaan ilman iskua koekappaleen pintaan. Vakiokokeessa painuma on tehtävä tasaisesti muovausnopeudella 5...20 mm/min. (SFS-EN ISO 20482 2003. Metallilevyjen ja -nauhojen Erichsenin kuppivenytyskoe. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.)

5.4 Reiänlaajennustesti

Useimpiin muovattaviin kappaleisiin pitää myös tehdä reikiä, jonka takia on myös tärkeä selvittää, miten kappaleen ominaisuudet käyttäytyvät reikää tehdessä. Reiänlaajennustestille on olemassa myös standardi ISO 16630, ja sitä voidaan käyttää 1,2 – 6 mm vahvuisten metallinauhojen ja -levyjen testauksessa, joiden leveys on vähintään 90 mm. Reiänlaajennustesti suoritetaan kahdessa vaiheessa, ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan reiänlävistys standardin mukaisen työkalun avulla. (Kuva 19.)

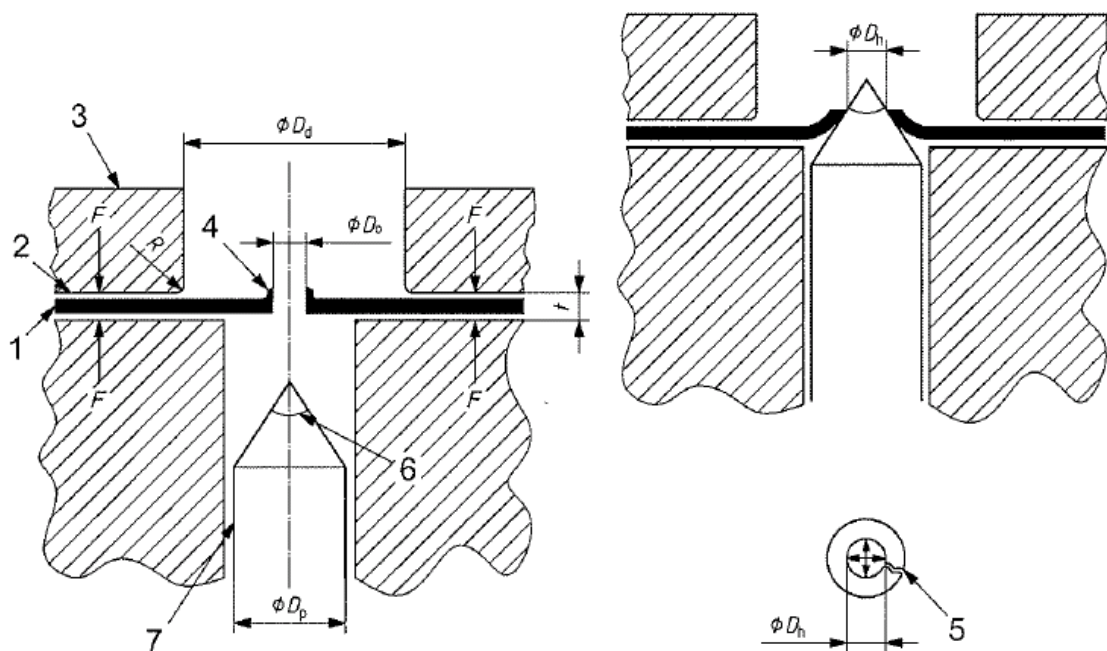


Kuva 19. Reiänlävistyksen periaatekuva ennen lävistystä ja sen jälkeen. 1.=koekappale, 2=tyyny, 3 lävistin, d_p =lävistimen halkaisija, d_d =tyynyn sisähalkaisija (ISO 16630:2009(E))

Toisessa vaiheessa reikää laajennetaan kartionmuotoisella painimella. (Kuva 20.) Pidäntvoiman pitää olla tarpeeksi suuri, jotta saadaan estettyä materiaalin virtaaminen. Kartion liike tulee pysäyttää heti, kun havaitaan murtuma, joka on edennyt levyn paksuuden läpi. Koekappaleen reiän halkaisija D_h mitataan kahdesta eri kohdasta ja niiden keskiarvolla lasketaan reiänlaajentumissuhde kaavalla (6). (ISO 16630:2009(E). Hole expanding test.)

$$\lambda = \frac{(D_h - D_0)}{D_0} \times 100 \quad (6)$$

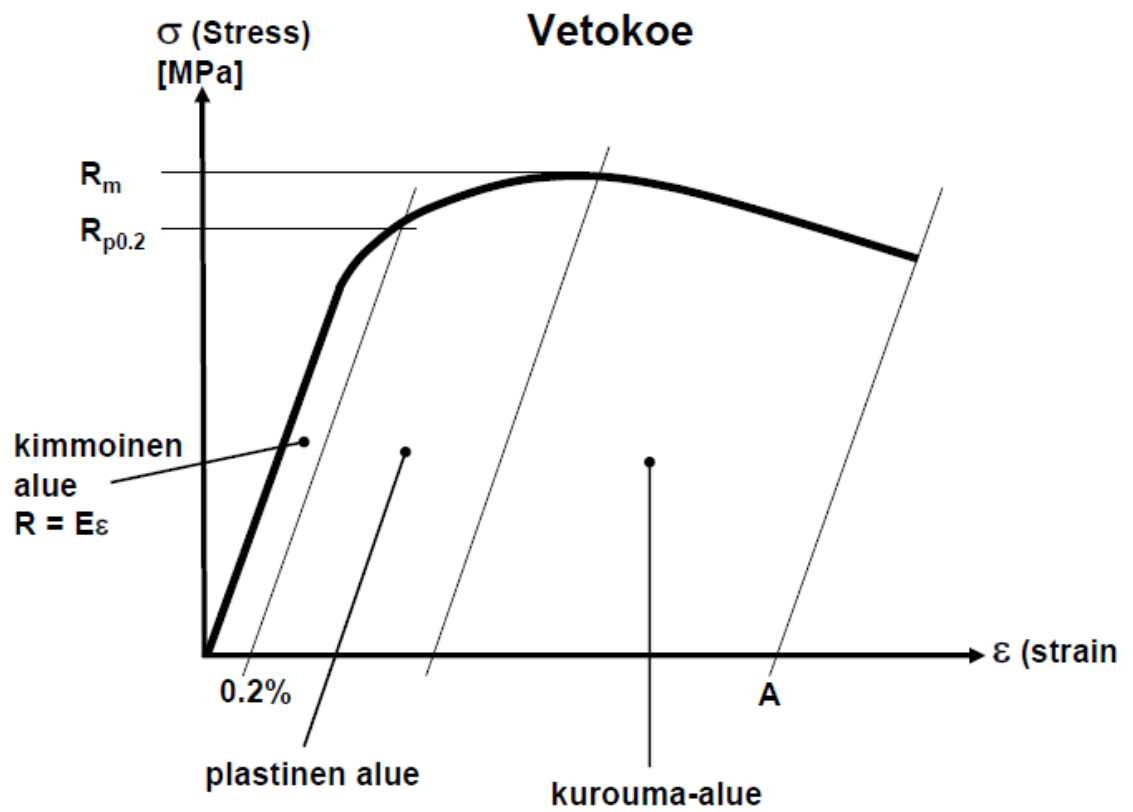
,missä λ on reiänlaajentumissuhde [%], D_h on reiän halkaisija laajennuksen jälkeen [mm] ja D_0 on reiän halkaisija ennen koetta [mm].



Kuva 20. Reiänlaajennuksen periaatekuva ennen ja jälkeen testin 1=koekappale, 2=vetorengas, 3=vetorengaan vastinpinta, 4=lävistys, 5=murtuma, 6=purse, Dd=vetorengaan sisähalkaisija, Dp=lävistimen alahalkaisija, Dh= reiän halkaisija murtuman jälkeen. (ISO 16630:2009(E))

5.5 Vetokoe

Vetokokeen merkitys muovattavuutta tutkittaessa on myös hyvin tärkeä, sillä saadaan selville materiaalin mekaaniset ominaisuudet (luku 3.1), ja näin ollen materiaalin soveltuvuus muovaukseen ylipäättään. Tärkeimmät metallien perusominaisuudet ovat lujuus ja sitkeys, jotka saadaan määritettyä vetokokeen avulla. Jännitysvenymäpiirros (kuva 21.) saadaan tehtyä, kun voima ja pitenemä on rekisteröity samanaikaisesti, joista lasketaan nimellisjännityksen arvot ja venymän arvot. Vetokokeen avulla määritetään myös muovattavuuden kannalta tärkeät r- ja n-arvot (luvut 3.2 ja 3.3). Nykyaikaisilla vetokoneilla joissa käytetään tietokoneohjelmaa ja ekstensiometrejä mittauksen apuna, saadaan ohjelmasta suoraan ominaisuudet tietokoneen näytölle. Standardi vetokokeen suorittamiseksi ja mekaanisten ominaisuuksien määrittämiseksi normaali huoneenlämmössä on SFS-EN ISO 6892-1. Samassa standardissa on myös suositukset tietokoneohjattujen vetokoneiden käyttöä varten. (Kivivuori Seppo 2008 Muokkaustekniikan perusteet. Hakupäivä 13.2.2012).



Kuva 21. Jännitys venymäkäyrä metallille. (Kauppi Timo 2005. Materiaalioppi 1 luentomateriaali pdf.)

6 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisessa osuudessa suoritettiin työhön rajatut testit, sekä vertailtiin tuloksia Optim 700 MC Plus -teräksen tuloksiin samoista testeistä. Kokeet suoritettiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa, edellä olevaan teoriaan pohjautuen sekä olemassa olevien työohjeiden että testikohtaisten standardien mukaisesti.

6.1 Koemateriaali

Rautaruukki toimitti materiaalin Optim 650 MC 3 mm suunnitellusti, jonka jälkeen testattavat näytteet leikattiin laserilla Tornion JaloTeräsStudiolla toimitettujen piirustusten ja ohjeiden mukaisesti. Taulukosta 2 löytyy tutkimuksessa käytettyjen materiaalien kemiallinen koostumus [%], lisäksi seoksissa voidaan käyttää niobia (Nb), vanadiinia (V), molybdeeniä (Mo), titaania (Ti) tai booria (B) yksin tai yhdistelminä. (Ruukki.fi. Hakupäivä 3.4.2012)

Taulukko 2 Kemiallinen koostumus [%] tutkimuksessa käytetyillä materiaaleilla.

Teräslaji	C Enintään	Si Enintään	Mn Enintään	P Enintään	S Enintään	Al Vähintään
Optim 650 MC	0,1	0,2	2	0,02	0,01	0,015
Optim 700 MC Plus	0,1	0,5	2,1	0,02	0,01	0,015

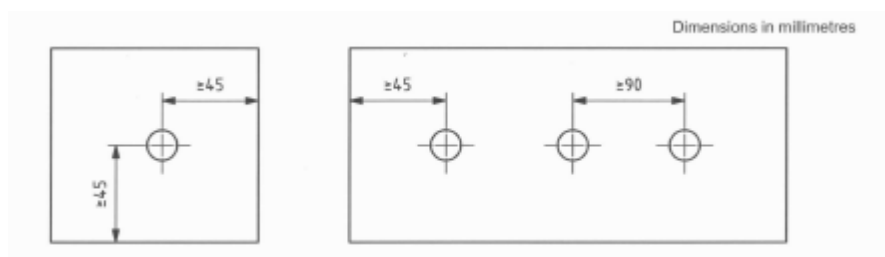
6.2 IE-luvun määrittäminen

Erichsenin-luvun määrittäminen tehtiin Erichsen 145–60 ohutlevyjen muovattavuustutkimuslaitteella ja testausmenetelmänä käytettiin Erichsenin kuppivenytyskoetta numero 40, jolla sallittavat levynvahvuudet ovat 2-3 mm, ja näin ollen merkataan myös IE-luku alaviitteellä 40. Laitteisto ja testausmenetelmä noudattavat standardin SFS-EN ISO 20482 suosituksia.

Testi suoritettiin painamalla standardin ohjeiden mukaisesti koekappaletta 20 mm pallomaisella painimella. Pidintoimana käytettiin 10 kN ja muovausnopeutena 10 mm/min. Testi aloitettiin 50 mm kappaleen reunasta ja standardin suositusten mukaisesti seuraavat testit 100 mm välein jokaisen testin keskipisteestä.

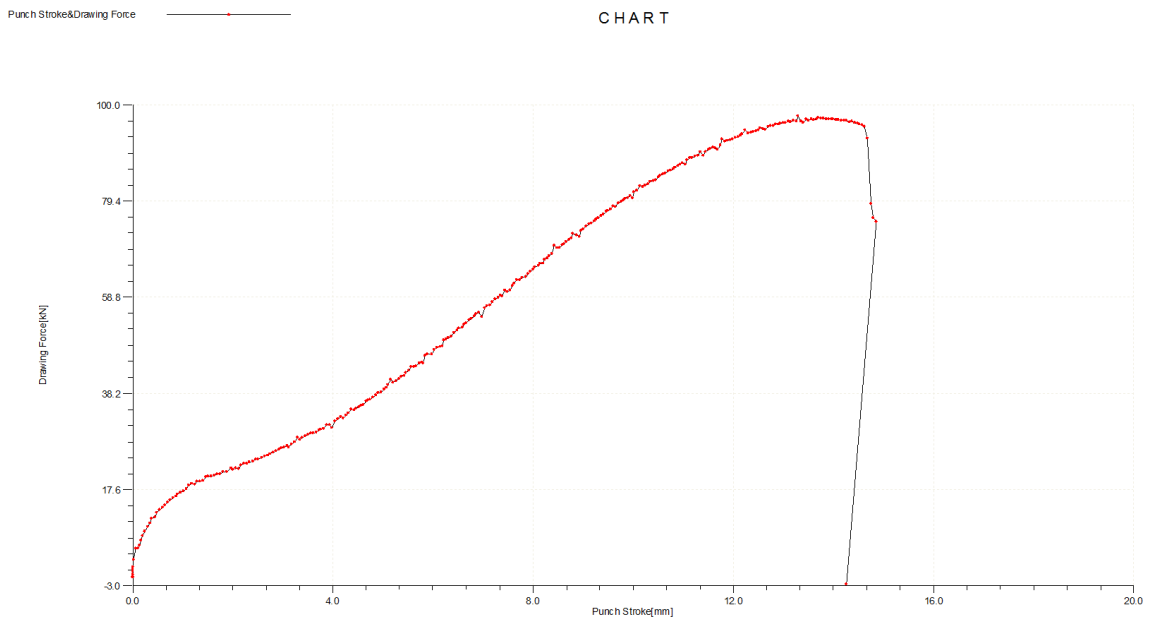
Voitelumenetelmänä käytettiin standardin suosittamaa grafiittirasvaa, jota siveltiin koekappaleen molemmiin puolin ohuesti.

Näyteaihiona oli 100 mm leveä valssaussuunnasta kohtisuoraan leikattu soiro. Näyteaihioon merkattiin kuppien keskikohdat ylittään 5 mm:llä (kuvan 22.) minimietäisyydet, eli kupujen keskipisteet olivat reunoista 50 mm ja toistensa keskipisteistä 100 mm. Näin merkiten saatiin suoritettua kolme testiä kumpaakin reunaan ja viisi testiä näyteaihion keskelle.



Kuva 22. Standardin määrittämät minimietäisyydet näyteaihiossa. (ISO 16630:2009(E))

Testit suoritettiin tietokoneohjattuna käyttäen Erichsen laitteeseen kuuluvaa MES-ohjelmistoa. Standardin mukaan testin tulos siis on painimen liikkuman mitta siinä pisteessä, kun koekappaleeseen on syntynyt läpimurtuma, josta näkyy valo läpi. MES-ohjelma antaa voima/painimen liike kuvaajan (kuva 23.), josta saadaan maksimi painimen voima [kN] sekä painimen liike [mm] eli IE-luku.



Kuva 23. Voima/Painimen liike kuvaaja MES-ohjelmasta. Erichsenin kuppikoetettissä teräkselle Optim 650 MC.

6.3 Reiänlaajennussuhteen määrittäminen

Reiänlaajennustesti suoritettiin samalla Erichsenin 145–60 muovattavuustutkimuslaitteella kuin Erichsenin kuppikoetustikin. Testausmenetelmänä toimi Standardin ISO 16630 määrittelemä reiänlaajennustesti. Standardista jouduttiin kuitenkin poikkeamaan reiänteon osalta, koska standardin mukaisessa testissä tarvittava osa rikkoutui, joten reiät jouduttiin tekemään pylväsporakoneella lävistyksen sijaan. Reiänlaajennustesti ehdittiin kuitenkin vielä uusiksi, kun toimitetusta koemateriaalista jäi tarpeeksi iso soiro testiä varten ja uusi osa saatiin tehtyä ammattiopiston toimesta.

6.3.1 Reiät poraamalla

Koska materiaali oli tarpeeksi vahvaa, uskalsi koeaihion kiinnittää ruuvipuristimilla kiinni ilman pelkoa taipumisesta. 10 mm reikien poraus suoritettiin leikkausnestettä käyttäen pylväsporakoneella manuaalisesti. Reikien teon jälkeen palattiin standardin mukaiseen testaukseen. Tehtyjä reikiä painettiin kartiomaisella painimella standardin mukaisesti siihen asti, kunnes havaittiin silmämääräisesti levyn paksuuden läpi menevä murtuma. Levynpidätinvoimana käytettiin 50 kN ja muovausnopeutena 15 mm/min.

Näyteaihiona käytettiin 150 mm leveää soiroa, joten standardin edellyttämät minietäisyydet täyttyivät mainiosti. (Kuva 22.) Reikien keskikohdat olivat 75 mm reunasta ja toistensa keskipisteestä 100 mm. Koeaihioon saatiin siis samoin kuin Erichsenin-testissäkin kolme testiä molempiin reunoihin sekä viisi keskelle.

6.3.2 Standardin mukaisesti reiät lävistämällä

Uusitus reiänlaajennustestissä reiät tehtiin standardin ISO 16630 mukaisesti lävistämällä, käyttäen standardin mukaisia työkaluja. Levynpidätinvoimana käytettiin 50 kN ja painimena toimi lävistintyökalu, jota painettiin 10 mm/min vauhdilla. Varsinainen reiänlaajennus suoritettiin samoin kuin edellä mainittiin.

Näyteaihiona toimi 100*600 mm soiro, joten standardin mukaisilla minietäisyyksillä soiroon saatiin suoritettua kuusi testiä.

6.4 Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen

Rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen suoritettiin samalla Erichsen 145–60 ohutlevyen muovattavuustutkimuslaitteella kuin edellisetkin testit. Lisäksi käytettiin venymämittauksissa GOM:n ARAMIS-venymämittausanalyysointia, johon kuuluu kaksi CCD-kameraa ja valaistuslaitteisto sekä tietokoneyksikkö (Liite 2). Testausmenetelmänä toimi Nakajima-testi, sekä testausmenetelmä että laitteisto noudattavat standardin EN ISO 12004–2:2008 suosituksia, jolle sallittavat levynvahvuudet ovat 0,3–4 mm. Teräksille kuitenkin suositeltu maksimipaksuus on 2,5 mm.

Ennen varsinaisen testin alkua GOM:n kamerajärjestelmä kalibroitiin ohjeiden mukaisesti ja siirrettiin Erichsen muovaustutkimuslaitteen yläpuolelle tarkoin määritellyn etäisyyden päähän. Näyteaihiot tarkastettiin ja mahdolliset vähäiset leikkausjäysteet poistettiin viilaamalla. Näyteaihiot puhdistettiin etanolilla ennen maalausta. Näyteaihiot spraymaalattiin valkoisella pohja ja mustalla stokastinen kuviointi mahdollisimman hienolla sumulla. Voitelumenetelmänä käytettiin standardin suosittamaa monimutkaisempaa menetelmää:

- I) rasva
- II) pyöreä aihio (Ø75 mm) PTFE kalvosta (0,1 mm)
- III) rasva
- IV) pyöreä aihio (Ø75 mm) pehmeästä PVC levystä (3 mm)
- V) rasva
- VI) pyöreä aihio (Ø75 mm) PTFE kalvosta (0,1 mm)
- VII) rasva

Standardi suosittelee käyttämään testissä niin suurta levyn pidätinvoimaa kuin mahdollista, joten tässä testissä käytettiin 600 kN pidätinvoimaa, joka on maksimi minkä Erichsen 145–60 antaa, tosin A-geometrian näytteille pidätinvoima ei jostain syystä noussut 585 kN korkeammalle. Kun pidätinvoima saavutetaan, otetaan kameroilla niin sanottu alkukuva johon verrataan venymiä. Koeaihion muovaus suoritetaan painamalla standardin mukaisella painimella, jonka halkaisija on 100 mm nopeudella 90 mm/min, ja samaan aikaan kun käynnistetään muovaus, käynnistetään myös kuvien ottaminen. Kuvaus suoritetaan kaksivaiheisena, jossa nopeampi vaihe (10 kuvaa/s) käynnistetään noin 20 kN ennen maksimivoiman saavuttamista. Testi päättyy koeaihion repeämään. Repeämän täytyy sijaita kuvun keskeltä < 15 mm standardin asettamien raja-arvojen mukaisesti, jotta testi voidaan hyväksyä. Testistä saatu data ja kuvat tallennetaan myöhempää analysointia varten, jossa Aramis ohjelma laskee ja määrittää FLC-käyrän.

7 TULOKSET

Tässä luvussa esitetään testikohtaisesti tulokset suoritetuista testeistä taulukkomuodossa sekä graafisesti.

7.1 IE-luku

Taulukossa 3 on esitetty testikohtaiset tulokset Erichsenin kuppikokeesta Optim 650 MC teräkselle.

Taulukko 3 Optim 650 MC Erichsen kuppikokeen tulokset

Testi	Optim 650 MC	Paksuus [mm]	Muovausnopeus [mm/min]	Pidätinvoima [kN]	Muovausvoima max. [kN]	IE ₄₀ -luku [mm]	ka. IE ₄₀ [mm]
1	reuna1	3	10	10	94,6	14,44	
2	reuna2	3	10	10	97,6	14,26	
3	reuna3	3	10	10	96,5	14,24	
							14,31
4	keski1	3	10	10	97,0	14,24	
5	keski2	3	10	10	99,3	14,82	
6	keski3	3	10	10	98,9	14,32	
7	keski4	3	10	10	97,4	14,26	
8	keski5	3	10	10	97,8	14,76	
							14,48
9	reuna4	3	10	10	100,3	14,50	
10	reuna5	3	10	10	100,5	14,28	
11	reuna6	3	10	10	97,3	14,16	
							14,31
							14,39

7.2 Reiänlaajennussuhde

Taulukossa 4 on esitetty testikohtaiset tulokset reiänlaajennuskokeesta, poraamalla reiät tehdyille Optim 650 MC -teräkselle. Taulukossa 5 on esitetty standardin mukaisesti tehdyn reiänlaajennuskokeen tulokset.

Taulukko 4 Optim 650 MC reiänlaajennuskokeen tulokset poraamalla reiät

Testi	Optim 650 MC	Paksuus [mm]	Muovausnopeus [mm/min]	Pidätinvoima [kN]	Muovausvoima max. [kN]	D ₀ [mm]	D _h [mm]	Suhde λ [%]	ka. λ
1	reuna1	3	15	50	55,5	10	18,74	87,4	
2	reuna2	3	15	50	53,0	10	16,08	60,8	
3	reuna3	3	15	50	68,3	10	16,89	68,9	
									72,35
4	keski1	3	15	50	64,7	10	18,51	85,1	
5	keski2	3	15	50	63,2	10	18,20	82,0	
6	keski3	3	15	50	61,3	10	17,84	78,4	
7	keski4	3	15	50	63,3	10	17,67	76,7	
8	keski5	3	15	50	65,8	10	18,28	82,8	
									80,98
									77,74

Taulukko 5 Standardin mukaisen reiänlaajennuskokeen tulokset Optim 650 MC

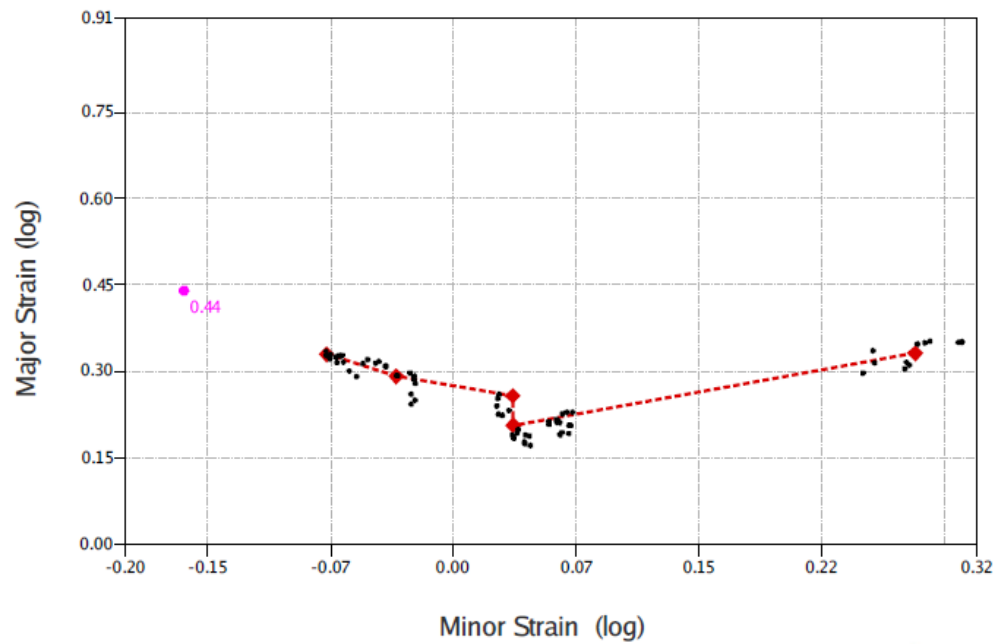
Testi	Optim 650 MC	Paksuus [mm]	Muovausnopeus [mm/min]	Pidätinvoima [kN]	Muovausvoima max. [kN]	D ₀ [mm]	D _h [mm]	Suhde λ [%]	ka. λ
1		3	15	50	47,3	10	15,84	58,4	
2		3	15	50	49,4	10	16,36	63,6	
3		3	15	50	43,3	10	14,34	43,4	
4		3	15	50	50,4	10	15,89	58,9	
5		3	15	50	46,8	10	14,85	48,5	
									54,54

7.3 FLC-käyrä

Kuvassa 24 on 24 näytteellä saatu rajamuovattavuuskäyrä teräkselle Optim 650 MC. Yksi omituinen poikkeama syntyi myös E-sarjan yhdestä näytteestä, piste näkyy kuvassa vasemmalla. Taulukossa 6 on esitetty keskiarvot rajamuovattavuuspisteistä geometrioittain teräkselle Optim 650 MC (3mm).

Taulukko 6 Optim 650 MC (3 mm) rajamuovattavuuspisteet geometrioittain

Geometria	Major Strain FLC	Minor Strain FLC
(leveys mm)	log.	log.
A (215)	0,33	0,28
B (115)	0,26	0,04
C (85)	0,21	0,04
D (55)	0,29	-0,03
E (25)	0,33	-0,08



FLC Optim 650 MC 3 mm

Kemi  Tornion
ammattikorkeakoulu

Kuva 24. FLC-käyrä Optim 650 MC -teräkselle

8 TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan ja analysoidaan kokeellisen osan testeissä saatuja tutkimustuloksia. Samoin suoritetaan vertailua Optim 700 MC Plus -teräksen tutkimustuloksiin ja tehdään yhteenvetoa tuloksista.

8.1 IE-luku

Standardi edellyttää vähintään kolmea onnistunutta testiä. Kupeista tarkistettiin vielä etäisyydet ja murtuman läpinäkyvyys, jotta testi täytti standardin vaatimukset. Tässä testissä onnistuivat kaikki yksitoista testiä, joista tulokset on esitetty taulukossa 3. Tulokset on vielä eritelty reunatuloksiin ja keskituloksiin, koska näytesoiro oli leikattu kohtisuoraan valssaussuuntaan nähden, näin tulokset kertovat koko levyn leveydeltä IE-luvun. Tuloksissa oli pientä eroa reuna- ja keskikohtien välillä, muttei merkittävää ja koko levyn IE-lukuhan on siis näiden tulosten keskiarvo. Teräksen Optim 650 MC 3 mm IE₄₀- luku on siis 14,39 mm. Kuvassa 25 on muutama tyypillinen Erichsenin kuppi testistä, murtuma syntyy tyypillisesti kuvan mukaiseen kohtaan, eikä kupin laelle kuten vaikkapa Nakajima -testin näytteillä.



Kuva 25. Erichsenin kuppeja Optim 650 MC -teräksessä.

8.2 Reiänlaajennussuhde

Koska testi suoritettiin kahdella toisistaan poikkeavalla tavalla, tarkastellaan myös tulokset erikseen.

8.2.1 Reiät poraamalla

Toisen reunan tulokset piti hylätä reiänlaajennustestissä, koska koneen säädöt eivät olleet heti oikein ja myös murtuman havaitseminen silmämääräisesti vaati totuttelua. Kuvassa 26 on kuva koeaihiosta ja laajennetuista reijistä, valitettavasti huonolla kameralla ei saa selvää kuvaa reiän päältä, jolloin näkisi myös murtumakohdan.



Kuva 26. Kuva poraamalla suoritettua Reiänlaajennustestien koeaihiota Optim 650 MC.

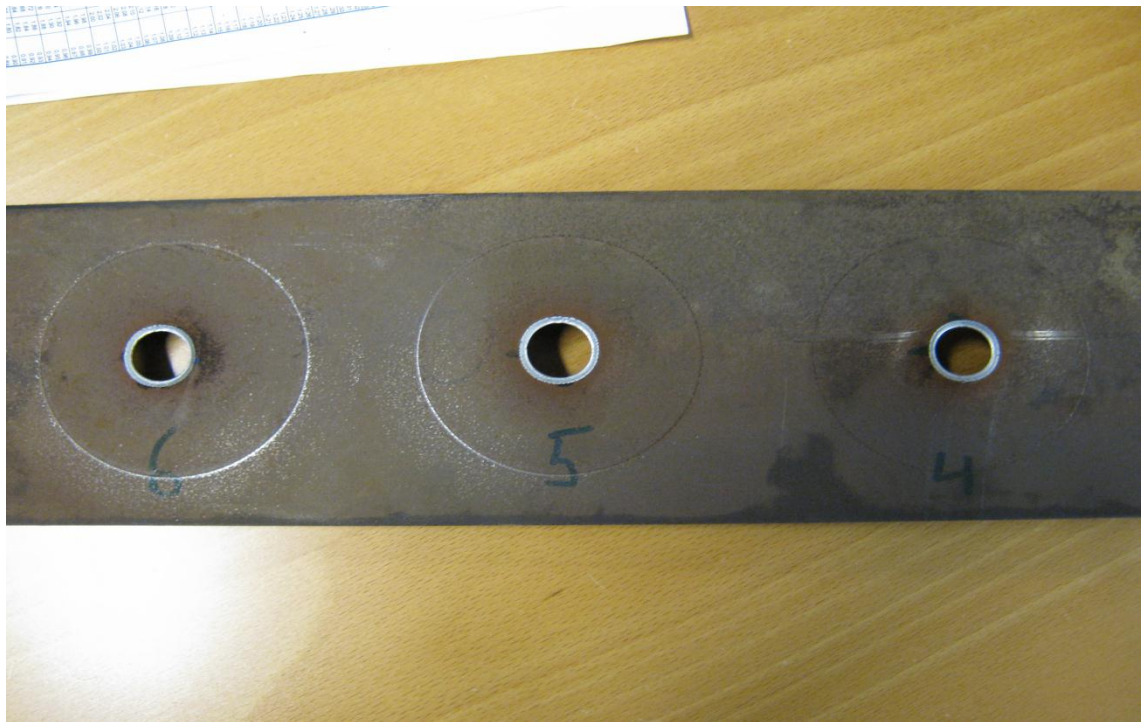
Loput kahdeksan testiä onnistuivat hyvin ja murtumatkin pystyttiin havaitsemaan kohtuullisen hyvin, koska tarkoin kuuntelemalla kuului pieni rasahdus murtuman syntyhetkellä. Reikien sisähalkaisijat mitattiin kahdesta eri kohtaa ja niiden keskiarvolla pystyttiin laskemaan reiänlaajentumissuhde kaavan (6) mukaisesti. Tulokset on esitetty taulukossa 4. Reunatulokset poikkeavat hiukan keskiosan tuloksista, mutta johtuen manuaalisesta koneen pysäytyksestä ja näin ollen inhimillisistä tekijöistä hajonta voi olla suurtaakin, joten reuna- ja keskiosan eroja ei voi varmuudella sanoa oikeiksi. Tuloksena reiänlaajentumissuhde 77,74 on todella hyvällä tasolla tämän lujuusluokan teräkselle, mutta tulokseen vaikutti manuaalinen poraus merkittävästi uusitun reiänlaajennustestien perusteella.

8.2.2 Reiät lävistämällä standardin mukaisesti

Yksi kuudesta testistä piti hylätä koska havaittu murtuma ei ollut edennyt levyn paksuuden läpi. Muut viisi testiä onnistuivat kuitenkin hyvin ja reikien etäisyydet täyttivät standardin vaatimat minimietäisyydet. Taulukossa 5 löytyy testikohtaiset tulokset koikeesta, ja näin standardin mukainen virallinen reiänlaajennussuhde Optim 650 MC:lle

on 54,54. Tuloksena saatu reiänlaajentumissuhde on yhä varsin hyvä tämän lujuusluokan teräkselle.

Lävistämällä suoritettun testin perusteella voidaan todeta, että poraamisesta aiheutui materiaalisia muutoksia teräksen ominaisuuksiin. Pelkästään tulos ei tätä todista vaan myös ulkonäkö, koska lävistämällä tehtyihin reikiin syntyi runsaasti pieniä alkumurtumia, joita ei ollut poraamalla tehdyissä reijissä. Kuvassa 27 on kuva koeaihioista sekä laajennetuista reijistä standardin mukaisesti suoritettuina.



Kuva 27. Standardin mukaisesti suoritettun reiänlaajennustestin koeaihio.

8.3 FLC-käyrä

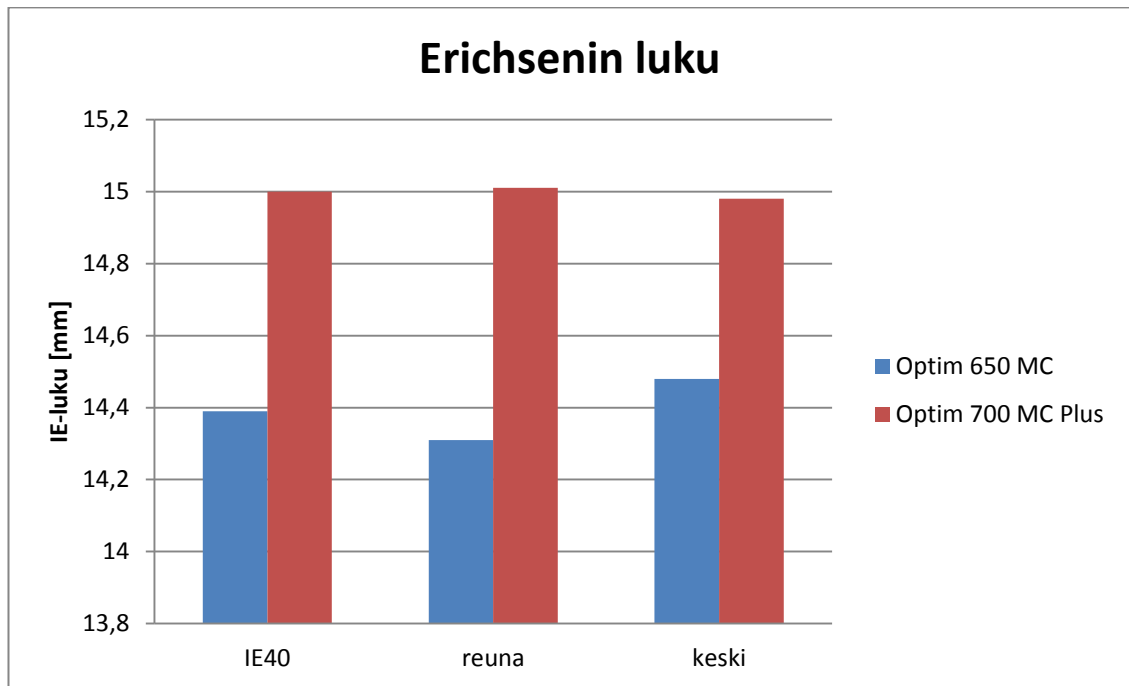
Koeaihioina Nakajima -testissä toimivat viisi eri geometriaa ja jokaista viisi kappaletta. (Liite1) A-geometrian näytteistä yksi piti hylätä kokonaan, koska Aramis ei kyennyt tunnistamaan venymiä tarpeeksi. Myös kolmea muuta A-geometrian näytettä ei jostain tuntemattomasta syystä Aramis hyväksynyt vaikka tunnistikin venymät, joten nämä näytteet hyväksyttiin manuaalisesti käyrän muodostamiseen, koska niiden venymäarvot vaikuttivat normaaleilta verrattuna seuraavan geometrian näytteisiin. Kuvassa 28 on jokaisesta geometriasta yksi mallikappale muovauksen jälkeen.



Kuva 28 FLC-näytteet A-E geometriaan.

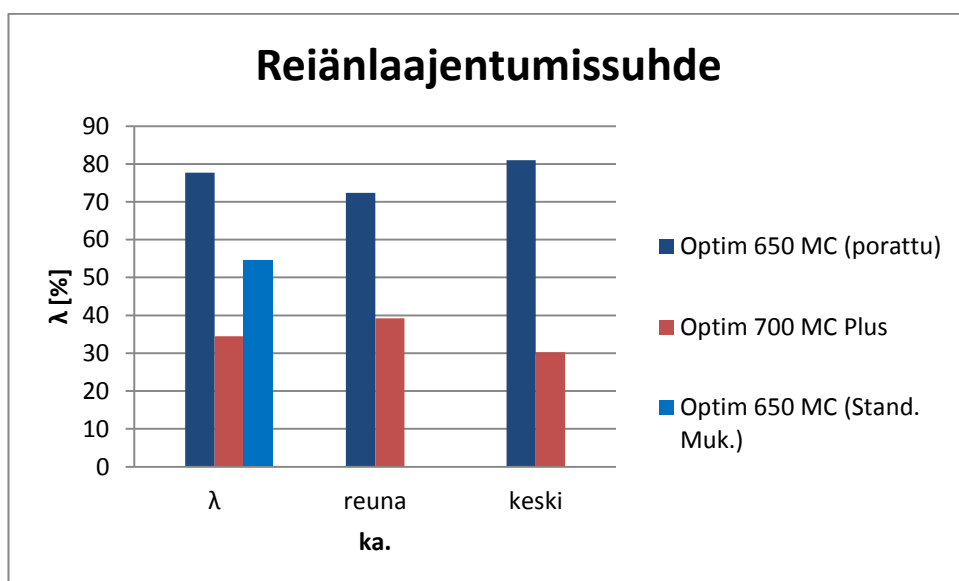
8.4 Tulosten vertailu Optim 700 MC Plus -teräkseen

Kaaviossa 1 on tehty IE-lukujen keskiarvojen vertailu Optim 650 MC -teräksen ja Optim 700 MC Plus -teräksen välillä. Vaikka Optim 700 MC Plussalla onkin noin puoli millimetriä parempi IE-luku, on myös Optim 650 MC:n IE-luku melko hyvä.



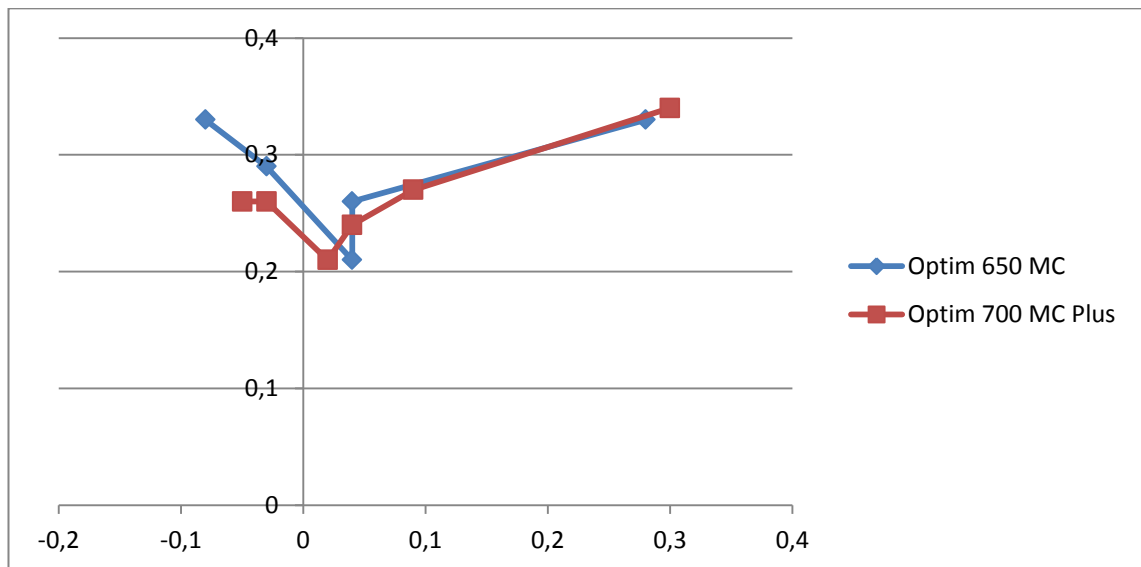
Kaavio 1. IE-lukujen keskiarvojen vertailu Optim 650 MC ja Optim 700 MC Plus

Kaaviossa 2 on tehty reiänlaajentumissuhteen keskiarvojen vertailu Optim 650 MC -teräksen ja Optim 700 MC Plus -teräksen välillä. Selvästi parempi reiänlaajennussuhde on Optim 650 MC:llä kuin Optim 700 MC Plussalla. Poraamalla suoritettuna reiänlaajentumissuhde on selvästi parhain, mutta materiaaliset vaikutukset ovat tuntemattomia ja koska standardista joudutaan poikkeamaan, ei poraamalla saatuja tuloksia voida virallisesti hyväksyä.



Kaavio 2 Reiänlaajentumissuhteen keskiarvojen vertailu Optim 650 MC ja Optim 700 MC Plus

Kaaviossa 3 on tehty FLC-käyrien vertailu Optim 650 MC -teräksen sekä Optim 700 MC Plus -teräksen välillä. Terästen FLC-käyrät ovat melko samalla tasolla, Optim 650 MC:n syvävedettävyys eli kaavion vasenpuoli näyttäisi olevan hiukan parempi kuin Optim 700 MC Plussalla. Venytysmuovattavuus eli kaavion oikeapuoli taas näyttäisi olevan hiukan parempi Optim 700 MC Plussalla, kuten myös Erichsenin kuppikoetesti myös todisti. Rajamuovattavuuspisteet kaaviossa osoittavat kuinka paljon prosentuaalisesti koeaihio on venynyt, miinus on puristunutta muodonmuutosta ja plussa venyvää.



Kaavio 3 FLC käyrien vertailu Optim 650 MC sekä Optim 700 MC Plus

8.5 Yhteenveto

Kaikista testeistä voidaan todeta että ne ovat standardien mukaisesti suoritettuja ja näin tulokset ovat virallisia ja niitä voidaan tarjota asiakkaille, jotka vaativat standardien mukaisia tuloksia. Yhteenvetona tuloksista voidaan sanoa että Optim 650 MC:n muovattavuus on aika lailla samaa luokkaa kuin Optim 700 MC Plussankin ellei jopa hiukan parempikin. Koska reiänlaajennussuhde on näinkin paljon parempi, voidaan todeta että Optim 650 MC sopii jopa paremmin muovausominaisuuksiltaan käytettäväksi esimerkiksi autoteollisuudessa ja sielläkään ei pelkästään palkkien materiaaleina vaan myös muissa alustojen tukiosissa. Toisaalta myös Optim 700 MC Plussaa voidaan tarjota vaihtoehtoisesti Optim 650 MC:n tilalle, koska muovattavuusominaisuudet ovat näinkin lähellä toisiaan ja lujuutta on vielä hiukan enemmän. Mahdollisesti jatkossa kannattaisi

suorittaa jatkotutkimus, mitä tapahtuu materialistisesti Optim 650 MC:lle kun porataan reiät lävistämisen sijaan, jotta selviäisi kannattaisiko reiät tehdä sittenkin poraamalla. Myös LDR testit kannattaisi suorittaa molemmille teräksille, jotta syvävedettävyyden tuloksetkin varmistuvat ja tarkentuisivat.

9 POHDINTA

Rajamuovattavuus ja sen tutkiminen oli täysin uutta asiaa työn alussa, joten haastetta riitti ja vaikealta asian oppiminen aluksi vaikutti. Aiheena ultralujat teräkset ja niiden muokkaaminen oli hyvin mielenkiintoinen. Valtavasti aiheen oppimista ja edistymistä auttoi myös se että sai työskennellä aiheen parissa täysipäiväisesti. Teoriaa opiskeleminen ja tutustumalla hyviin työohjeisiin ja standardeihin itse kokeellisen osuuden suorittaminen oli jo sitten helpompaa. Toki jokaisen testin yhteydessä joitain pieniä ongelmanratkaisuja joutui suorittamaan, mutta kokeellinen osuus onnistui kauttaaltaan kohtuullisen hyvin. Tärkeimpänä tavoitteena ollut rajamuovattavuuskäyrä saatiin määritettyä pienistä näytteen tunnistusongelmista huolimatta. Myös kriittisesti tärkeän osan hajoaminen ennen reiänlaajennuskoetta oli ikävä asia, mutta onneksi testi ehdittiin uusimaan ja materiaali riitti. Jo ennen työn alkua tehty riskianalyysi osui varsin hyvin kohdalleen ongelmien suhteen, materiaalin määrässä meinasi tulla paha virhe, mutta onneksi se ehdittiin korjata ja estää. Samoin laiterikolla oli hyvin merkittävä vaikutus työhön, ja osaamisen puutteellakin oli vaikutusta joka asiaan, mutta kaiken kaikkiaan kaikki sujui melko hyvin ja tietämys kasvoi valtavasti tällä aihealueella.

Optim 650 MC -teräksestä saatiin selville paljon sen muovausominaisuuksista ja siten sen soveltuvuudesta muovausprosesseihin ja mahdollisesti myös uusia käyttökohteita sille. Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista saada tietää mitä materiaalin mekaanisille ominaisuuksille tapahtuu, kun reiät porataan lävistämisen sijaan. Näin saataisiin selvyyttä, miksei reikiä tehdä poraamalla, vaikka selvästi parempi reiänlaajentumissuhde tulisi niin tekemällä. LDR-testit kannattaisi myös suorittaa sekä Optim 650 MC:lle että Optim 700 MC Plussalle, jotta saataisiin lisää tietoa niiden syvävedettävyydestä.

Työssä suurta hankaluutta aiheutti myös julkisen tiedon vähäinen löytyminen muovauskokeista muille teräksille ja siten vertailu olikin hankalaa. Mahdollisesti jatkossa kannattaisi julkaista teräksistä ja niiden muovausominaisuuksistakin enemmän tietoa, mutta ainakin firmojen sisäinen tietopankki olisi hyvä olla olemassa. Todella mielenkiintoinen aihe jatkotutkimukselle olisi myös kahden samanvahvuisen ja yhtä lujan kuuma- ja kylmävalssatun teräksen muovausominaisuuksien vertailu. Erittäin mielenkiintoista olisi myös selvittää, kuinka muovauskoetuloksiin vaikuttaa saman materiaalin lujuuden sekä vahvuuden muuttuminen. Tietoa löytyy julkisesti tällä hetkellä yksittäisistä kokeista

tietyllä lujuudella ja tietyllä vahvuudella tehtynä muttei tarpeeksi, jotta voisi tehdä kattavaa vertailua.

Ihmetystä myös aiheuttaa Standardin ISO 12004-2 suositus 2,5 mm terästen maksimivahvuudeksi FLC:n määrittämisessä, vaikka molempien 3 mm vahvuisten ultralujien Optim 650 MC:n ja Optim 700 MC Plussan FLC:n määrittäykset on saatu onnistuneesti suoritettua.

10 LÄHDELUETTELO

High strenght hot-rolled steel sheets for automobiles 2003. Nippon steel. Hakupäivä 21.2.2012. <http://www.nsc.co.jp/en/tech/report/pdf/n8803.pdf>

ISO 16630:2009(E). Hole expanding test.

Juntunen Päivi, 2010 Tutkimus teräksen EN 1.4512 rajamuovattavuudesta. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Kauppi Timo 2005. Materiaalioppi 1 luentomateriaali pdf.

Kesti Vili, 2010 Mikrorakenteen vaikutus lujan teräksen särmäys ja muovattavuusominaisuuksiin. Oulun yliopisto. Diplomityö.

Kivivuori Seppo & Härkönen Seppo 2009. Lämpökäsittelyoppi. Tampere.

Kivivuori Seppo 2011, Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Teräsohutlevyjen muovattavuus ja materiaalilaadut. Hakupäivä 31.1.2012.

http://www.ohutlevy.com/pdf/terasohutlevy_seppo_kivivuori.pdf

Kivivuori Seppo 2011. Aalto yliopisto. Lämpökäsittelyn perusteet Hakupäivä 8.2.2012.

https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-0.3316/luennot/MT-0_3316_kertaus.ppt

Kivivuori Seppo 2008. Aalto yliopisto, teknillinen korkeakoulu. Muokkaustekniikan perusteet. Hakupäivä 13.2.2012. [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-0.2116/materiaali/MT-0_2116_kurssin_pruju.pdf)

[0.2116/materiaali/MT-0_2116_kurssin_pruju.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-0.2116/materiaali/MT-0_2116_kurssin_pruju.pdf)

Kivivuori Seppo 2006. Levynmuovauksen menetelmät ja perusteet. Ohutlevy 2.

http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy206_s58-62.pdf

Larkiola Jari 2006. Metallien muovaus. VTT tuotteet ja tuotanto osa1 pdf.

Martikainen Lassi 2006. HAMK. Ohutlevyn muovattavuuden kuvaaminen rajamuovattavuuspiirroksen avulla. Ohutlevy 2. http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy206_s52-56.pdf

Mikkonen Pertti 2008. Kuumavalssattujen lujien terästen konepajakäytettävyys pdf.

Optim-MC rakenneteräokset pdf. Ruukki.fi. Hakupäivä 8.2.2012

Patel Jitendra & Klinkenberg Christian & Hulka Klaus. Hot rolled HSLA strip steels for automotive and construction applications. Hakupäivä 22.2.2012.

http://static.gest.unipd.it/esercizi/IIP_pmmi/acciai_altoresistenziali.pdf

Ruostumattoman teräksen muovaamisen mahdollisuudet. Euro inox. Hakupäivä

31.1.2012. http://www.euro-inox.org/pdf/map/FormingPotential_FI.pdf

Ruukki.fi. Hakupäivä 3.4.2012

SFS-EN ISO 20482 2003. Metallilevyjen ja -nauhojen Erichsenin kuppivenytyskoe. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.

SFS-EN ISO 12004-2 2009. Metallilevyjen ja – nauhojen rajamuovattavuuskäyrän määrittäminen osa 2. Standardi Suomen standardisopimusliitto SFS.

Thermomechanical control process. Hakupäivä 9.2.2012.

<http://www.leonghuat.com/articles/Thermomechanical%20Control%20Process.htm>

Thermomechanical rolling of hot strip for line pipe application, Niobium Information. Hakupäivä 8.2.2012. (HOX Tarkasta ja poista tarvittaessa)

http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/others_in_pdf/pdfs/Thermomechanical.pdf

ThyssenKrupp steel:n erikoislujat erikoisrakenneteräokset. Hakupäivä 8.2.2012.

http://www.flinkenberg.fi/steel/vkoski/material/2008-07-25_sonderbaustaehle_fi_finale.pdf

Viljamaa Ahti 2010. Muokkaavia ja muovaavia valmistusmenetelmiä. Hakupäivä

8.2.2012. https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/mt-0.2116/materiaali/MT-0_2116_kurssin_pruju_osa_2.pdf

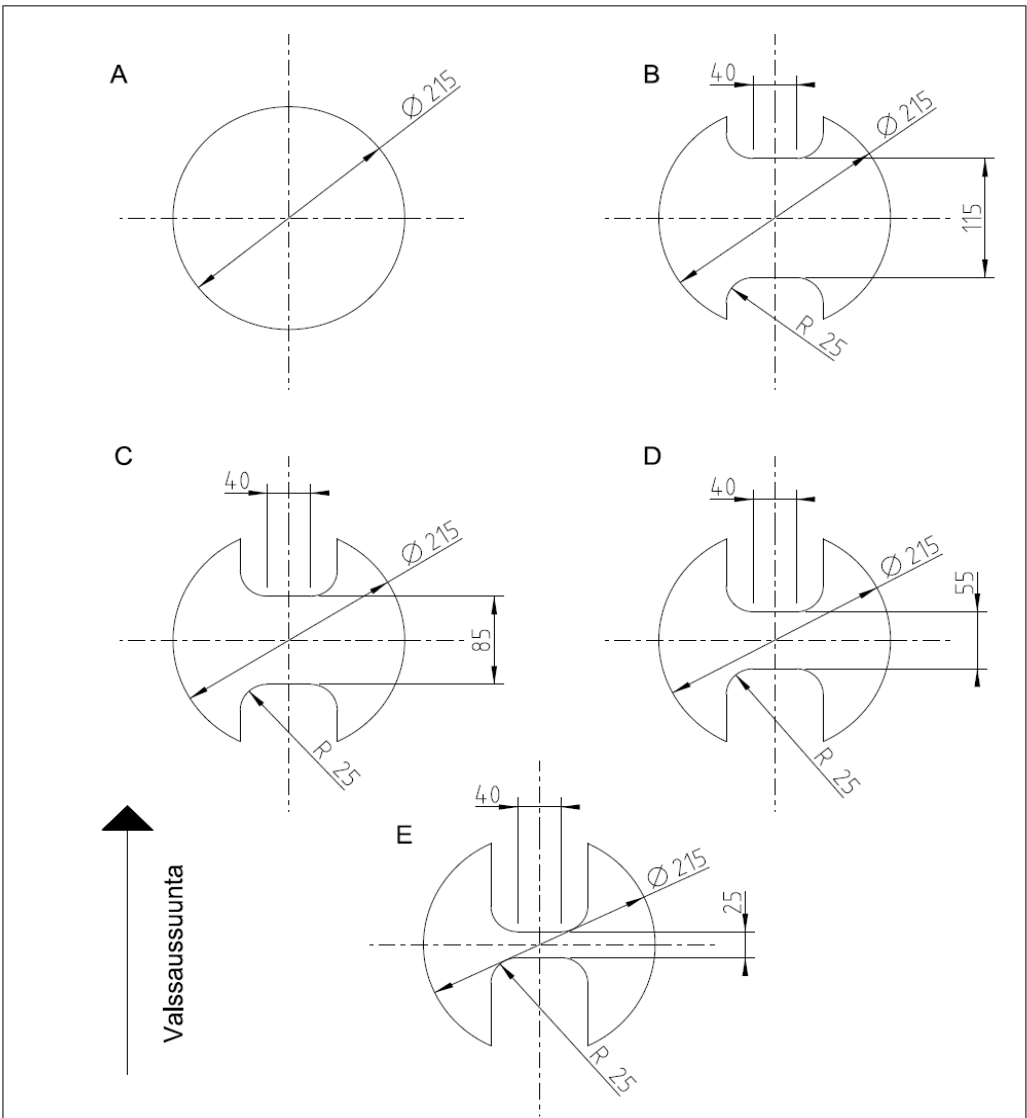
Väyrynen Jukka. Tuoteohjelma 2011 Kuumavalssatut teräokset Raahen tehtaalta. Hakupäivä 6.2.2012.

<http://www oulu.fi/fmt/FMT5/PDF/LaserWorkShop260511/Kuuma%20Valss%20TuoteOhjelma%202011.pdf>

11 LIITELUETTELO

Liite 1 FLC-Näytteet

Liite 2 Kuvia testauslaitteista



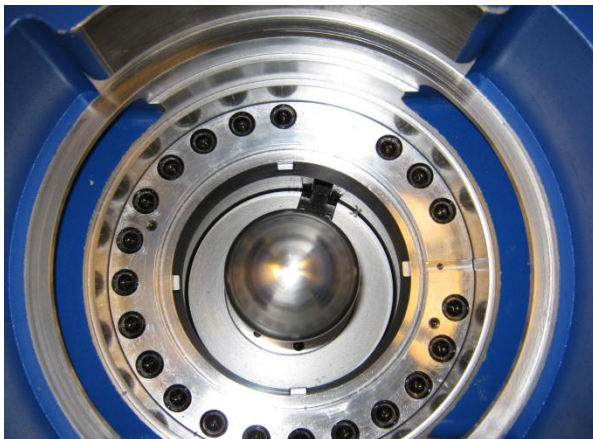
OSA	NIMI	RAAKA-AINE	PIIR/STANDARDI	KPL	PAINO KG
			SUUNNITTELIJA/PIIRTÄJÄ		
			R.Vierelä		
			PÄIVÄMÄÄRÄ		
NIMI 1 FLC-Testiaihiot			6.2.2012		
NIMI 2		LIITTYY	PROJEKTI		A4
			Suro2		
		PAINO KG	PIRTOSUHDE	PIIR.NRO	REVISIO
			1:5	1005	



Kuva 29. Erichsen 145–60 muovattavuustutkimuslaite



Kuva 30. GOM:n optinen venymänmittaus kamerajärjestelmä



Kuva 31. Nakajima -testissä käytettävä painintyökalu Erichsen laitteessa



Kuva 32. Erichsen 145–60 laitteen työkaluja



Kuva 33. Liikuteltava ARAMIS tietokoneyksikkö